

re radioelektronik

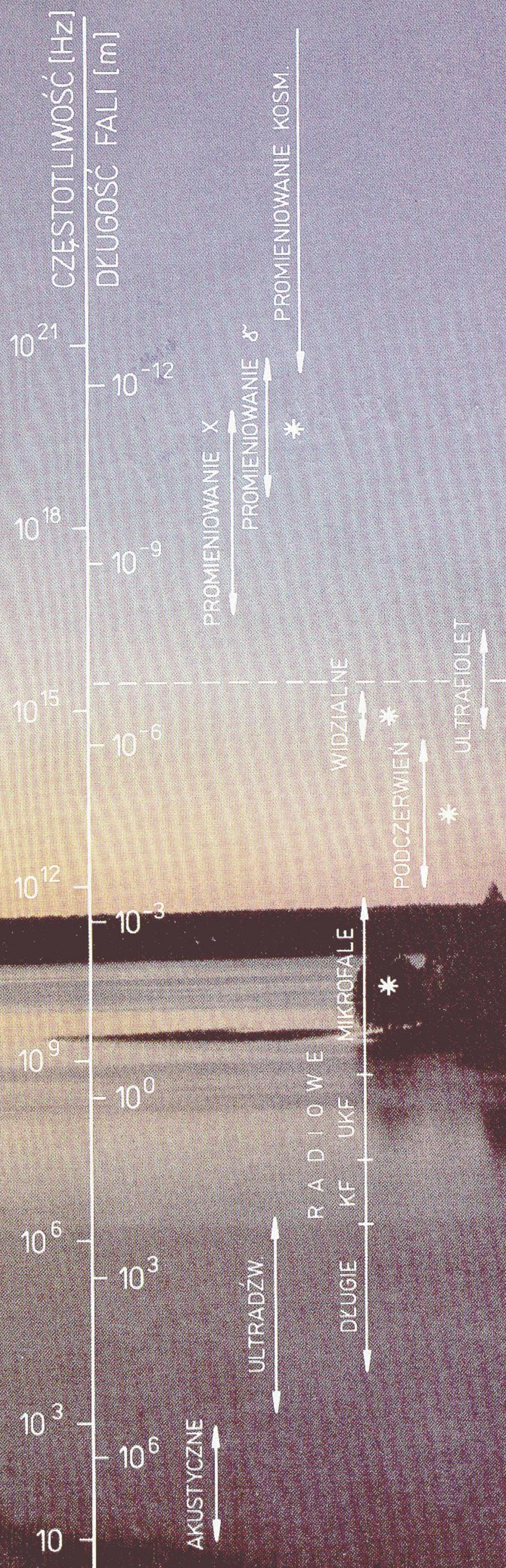
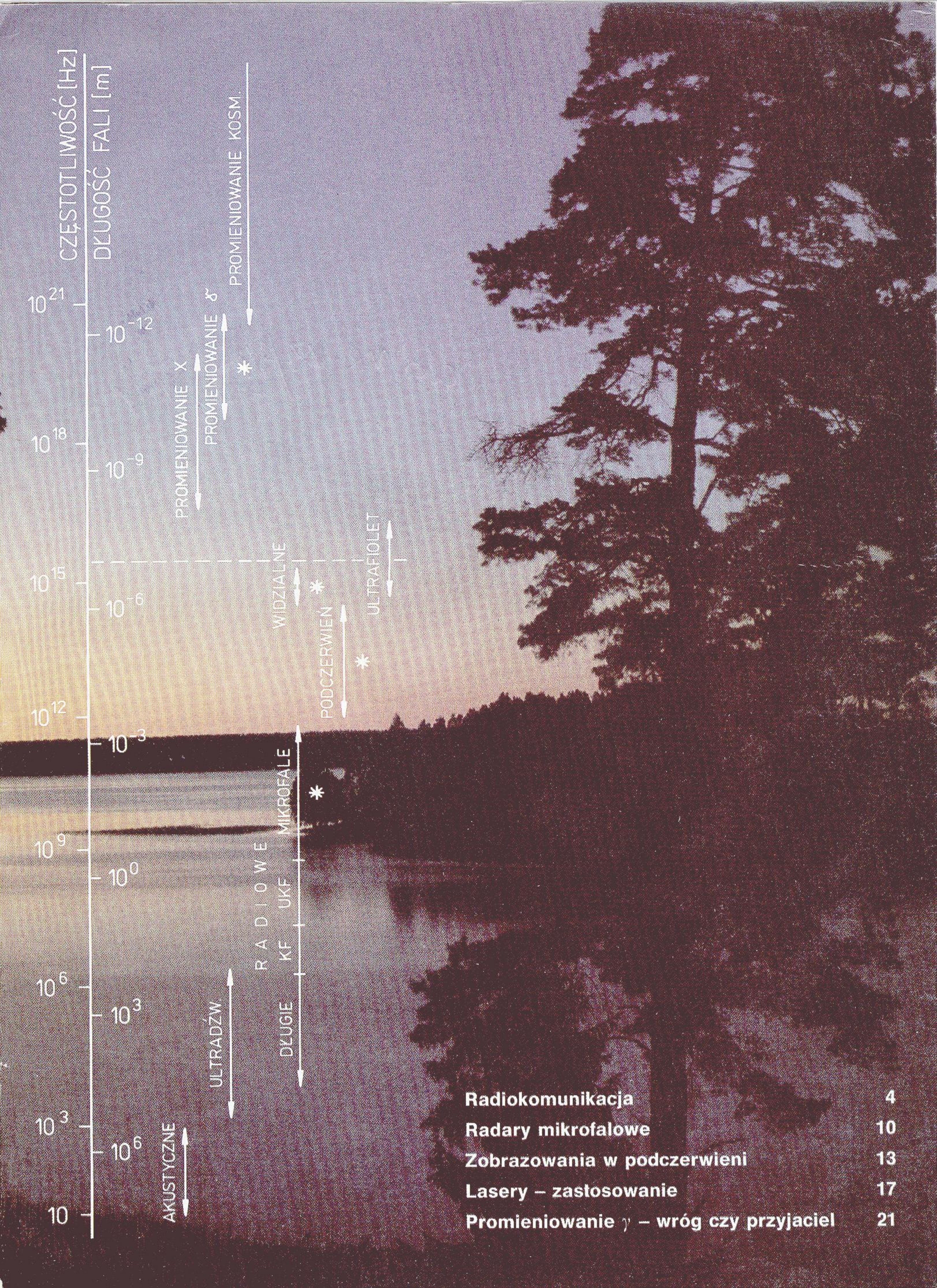
AUDIO *hi-fi* **VIDEO**

Indeks 374040

Pismo istnieje od 1924 roku

NUMER
SPECJALNY





Radiokomunikacja	4
Radary mikrofalowe	10
Zobrazowania w podczerwieni	13
Lasery – zastosowanie	17
Promieniowanie γ – wróg czy przyjaciel	21

Drodzy Czytelnicy – Prenumeratorzy

Z podziękowaniem za zaufanie do naszego pisma i wierność w jego prenumeracie, przekazujemy Wam obiecany dodatek na zakończenie 70. roku istnienia naszego pisma.

Zawartość tego dodatku wymaga pewnych wyjaśnień, dlaczego taka jest jego treść.

Z lewej strony widzą Państwo schemat widma elektromagnetycznego, którego osią jest częstotliwość fal elektromagnetycznych.

Na co dzień spotykają się Państwo na stronicach "Re" na ogół z wąskim pasmem olbrzymiego zakresu częstotliwości i w tej części najniższej obejmującej różnorodne zastosowania elektroniki, a przede wszystkim to, co dotyczy popularnie zwanego obszaru RTV.

Dlatego właśnie uznaliśmy za celowe i, mamy nadzieję, pożyteczne dla naszych Czytelników przedstawienie, choć w dużym skrócie, ale w miarę przystępnie, mniej znanych możliwości wykorzystania wyższych pasm widma częstotliwościowego. Wybraliśmy tylko niektóre z nich, przede wszystkim z racji ograniczonych możliwości objętości i aby nie zmęczyć Czytelników nadmiarem informacji.

Zanim przejdziemy do omówienia wybranych pasm widma, wyjaśnijmy może, skąd się ono wzięło.

Fizyk angielski James Clerk Maxwell (1831-1879) sformułował w 1864 roku równanie stanowiące podstawę teorii pola elektromagnetycznego.

Znane już wcześniej oddzielne pojęcia pola elektrycznego i magnetycznego, znalazły swój ścisły związek.

Opierają się na tym fundamentalnym równaniu wszystkie dziedziny techniki związane z wytwarzaniem, przekazywaniem i wykorzystaniem energii elektrycznej i fal elektromagnetycznych.

Stało się to podstawą elektrodynamiki kwantowej oraz poznania elektromagnetycznej natury światła.

To była jednak dopiero teoria, wynik wiedzy matematycznej i intencji twórczej.

W dwadzieścia lat później (1886 rok) inny fizyk, tym razem niemiecki, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) odkrył doświadczalnie fale elektromagnetyczne.

Swoim oscylatorem (zwanym oscylatorem Hertza) poparł istnienie przewidzianych teoretycznie przez Maxwella możliwości wykorzystania tych fal.

Dlatego też Hertza często nazywamy twórcą lub odkrywcą radiokomunikacji, której podstawy do dziś obowiązują.

Dodać jeszcze należy, że zaledwie rok później (1887) tenże Hertz odkrył zjawisko fotoelektryczne, z którego korzystamy dziś, prawie na co dzień.

Wróćmy po tej krótkiej, ale jakże ważnej historii do widma fal elektromagnetycznych. Podzielono je umownie na pasma, w zależności od sposobu generacji i detekcji. Granice tych pasm często zachodzą na siebie w miarę rozszerzania się możliwości zastosowań. Wszystkie fale elektromagnetyczne ulegają odbiciu, załamaniu, ugięciu (dyfrakcji), interferencji. Im fale są krótsze, tym coraz słabiej występują cechy falowe, a coraz wyraźniej korpuskularne.

Wykrywanie fal elektromagnetycznych wymaga na ogół użycia przetworników energii fal elektromagnetycznych w inne formy energii.

Tylko niewielka część widma fal elektromagnetycznych jest wykrywana bezpośrednio przez nasze zmysły. Jest to pasmo światła widzialnego oraz bardzo mały zakres fal akustycznych odbieranych przez nasz słuch.

W miarę upływu czasu i rozwoju ogólnego nauki i techniki, fale elektromagnetyczne w swoich kolejnych pasmach, znalazły i nadal znajdują olbrzymią liczbę zastosowań, niektóre z nich nie do przewidzenia w przeszłości i nadal w przyszłości.

A teraz wracam do treści naszego dodatku i wyboru tylko fragmentów zastosowań fal elektromagnetycznych.

Wychodząc z założenia, że mniej lub więcej znane są Czytelnikom pasma potocznie zwane akustycznymi (dźwiękowymi) oraz fale radiowe i telewizyjne od długich do bardzo krótkich (z satelitarnymi włącznie), chcemy zwrócić uwagę na obszary mniej znane, ale nie mniej ważne, a nawet bardzo ważne dla naszego życia i cywilizacji.

Chcieliśmy zacząć od **ultradźwięków**, ale objętość na to nie pozwoliła. Przedstawimy je jednak w przyszłym roku w normalnej edycji pisma.

Tu tylko wspomnimy o nich. Kto nie korzystał dziś (oby jak najrzadziej) z popularnego USG. Jest to skrót ultrasonografii, zastosowania ultradźwięków w medycynie. W ultrasonografii, będącej diagnostyką ultradźwiękową opartą na zjawisku echa, "podpatrzono" zmysły jakic posiada nietoperz, jedyne w swoim rodzaju (patrz okładka). Zjawisko to umożliwia (w połączeniu z monitorem) wizualizację struktur anatomicznych nawet poruszających się, jak serce lub płód. Metoda druga, dopplerowska, znany "gwizd" przy mijaniu się pociągów, umożliwia pomiary prędkości przepływu krwi w tętnicach, żyłach, sercu. Ale, już wspomniałem, do szerszego omówienia ultradźwięków wrócimy.

Drugi obszar widma elektromagnetycznego, który chcemy przedstawić naszym Czytelnikom, to **radiokomunikacja**. Może to budzić zdziwienie – przecież ten obszar elektroniki jest stałym działem "Re". Tu chcemy przybliżyć Czytelnikowi cały obszar tej dziedziny, aby a priori wyjaśnić, że od szerszego zrozumienia całości zagadnień telekomunikacji, w której radiokomunikacja stanowi istotną część "nie uciekniemy".

Jest to wymóg czasów i codziennych potrzeb. Wymieńmy tu choćby systemy przesyłania informacji cyfrowych, które są szczególnym rodzajem systemów telekomunikacyjnych. Innym przykładem może być cała optoelektronika, o której nie śniło się nam ćwierć wieku temu.

Następnym pasmem widma elektromagnetycznego wchodzimy w obszar częstotliwości gigahercowych. Są nam one znane choćby z coraz szerzej prezentowanej na naszych łamach techniki satelitarnej. Są to już mikrofae, które mają także wiele innych zastosowań, od kuchenki mikrofalowej do radarów.

Właśnie **radary mikrofalowe** stanowią następny rozdział naszego dodatku. Ich znaczenie i waga są tak duże, że bliższe zapoznanie się z zasadami ich pracy myślę, że przyda się każdemu. Systemy radarowe (właściwa nazwa – radiolokacyjne) to gwarancja bezpieczeństwa na drogach, w powietrzu i na morzu. Kto nie zetknął się z kontrolą radarową, czasem nieprzyjemną dla kierowcy, ale skuteczną. Dzięki radarom do absolutnego minimum zmalały przypadki katastrof lotniczych z powodu zderzeń samolotów w powietrzu, choć przecież dróg lotniczych (mylnie zwanych kanałami powietrznymi) jak i samolotów ciągle przybywa. Podróż statkiem we mgle jest możliwa dzięki radarom itd.

W naszej "wędrowce" po widmie elektromagnetycznym dochodzimy do obszaru teraherców (10^{12} Hz). W tym pasmie "króluje" **podczerwień**. Nie wszyscy zdają sobie sprawę, że możemy korzystać z promieniowania podczerwonego zarówno na co dzień, np. pilot OTV lub magnetowidu, jak i w warunkach szczególnych, np. widzenie w nocy (noktowizja) – jeden z podstawowych elementów technicznych współczesnego wojska. Ale jest też i inne zastosowanie, ważne zarówno w technice jak i medycynie. To odzwierciedlenie temperatury w szerokim zakresie w postaci wizualnej. Jak interesujący jest obraz wnętrza człowieka pod tym względem. O tym właśnie jest mowa w tym rozdziale.

Wreszcie wchodzimy w obszar światła widzialnego w naszym widmie, które rozciąga się od czerwieni (782 nanometry) do fioletu (388 nanometrów).

Przesyłanie sygnałów (informacji) za pomocą światła było znane od najdawniejszych wieków. Było to światło Słońca, a później np. żarówki elektrycznej, zwane światłem spójnym. Można było z niego korzystać tylko na odległość wzroku. Dopiero pojawienie się **lasera**, który dostarcza światło przestrzennie i czasowo spójne stworzyło oszałamiające perspektywy rozwoju optycznych systemów przenoszenia informacji (telekomunikacja optyczna), jak i różnorodnych zastosowań tego rodzaju praktycznie monochromatycznego światła w technice, medycynie i...

Na koniec naszego widma dochodzimy do promieniowania o najkrótszej długości fali, do **promieniowania gamma**. Sam tytuł rozdziału mówi już bardzo wiele, czy promieniowanie to jest wrogiem, czy przyjacielem człowieka. Jakie wnioski można wysnuć, powie nam ostatni rozdział.

Kończąc chyba ten zbyt długi wstęp, wierzę że Czytelnicy nasi odbiorą pozytywnie tę może niekiedy trudną porcję wiedzy, która jednak rozszerzy ich horyzonty myślowe, co było celem "prezentu" dla naszych Prenumeratorów. Życzę wszystkim dalszego zainteresowania tak piękną dziedziną wiedzy, jaką jest elektronika.

Redaktor Naczelny

Od przeszło stu lat, od kiedy w latach 80. XIX wieku prof. Heinrich Hertz odkrył zjawisko promieniowania elektromagnetycznego, fale radiowe są przez człowieka wykorzystywane do przesyłania informacji drogą bezprzewodową. Radiokomunikacja stała się jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się gałęzi nauki i techniki, która przyspiesza rozwój cywilizacyjny ludzkości. Z jednej strony wzrasta zapotrzebowanie na bezprzewodowe usługi telekomunikacyjne, z drugiej poziom techniki i technologii, zwłaszcza technologii układów scalonych i techniki komputerowej, umożliwiając zaspokojenie tych potrzeb. Co więcej rośnie zarówno jakość, jak i liczba oferowanych usług.

Radiokomunikacja

Piotr Gajewski



Współczesna radiokomunikacja, której medium transmisyjnym jest otaczająca przestrzeń elektromagnetyczna wykorzystuje bardzo szeroki zakres częstotliwości od dziesiątków kiloherców do setek gigaherców, od zakresu częstotliwości fal akustycznych po zakres częstotliwości promieniowania podczerwonego, podzielony na umowne pasma.

Na rysunku 1 przedstawiony jest podział pasma częstotliwości wraz z przeznaczeniem poszczególnych podzakresów. Dalej ograniczymy się do rozważania pasma fal radiowych od fal bardzo długich do fal ultrakrótkich zakresu milimetrowego. Granice podziału na poszczególne zakresy są umowne, jednak fale różnych zakresów długości rozchodzą się różnymi sposobami. Tylko w ośrodku izotropowym i jednorodnym – w idealizowanej wolnej przestrzeni – fale radiowe rozchodzą się wzdłuż linii prostych ze stałą prędkością. Bliskość powierzchni Ziemi i właściwości jej atmosfery powodują powstawanie zjawisk:

- pochłaniania energii (absorbpcja),
- rozpraszania energii (dyspersja),
- uginania fali (dyfrakcja),
- załamania i odbijania fali (refrakcja).

Łącze radiowe jest określone, przede wszyst-

kim przez zasięg użytkowy i zasięg zakłócenio-
wy. Zasięg użytkowy jest to maksymalna odległość od nadajnika, przy której uzyskuje się stosunek sygnału do zakłóceń gwarantujący, określoną jakość odbioru. Zasięg zakłócenio-
wy wyznacza maksymalną odległość od nadajnika, powyżej której poziom sygnału emitowanego przez ten nadajnik nie wpływa na pracę odbiorników sygnałów z innych źródeł. Podstawowymi czynnikami, które mają wpływ na obydwa zasięgi są: moc promieniowana przez nadajnik, rodzaj i parametry modulacji, wzniesienia środków elektrycznych – anten (nadawczej i odbiorczej), zysk energetyczny anteny odbiorczej, czułość środowiskowa odbiornika (określana w realnych warunkach występowania zakłóceń zewnętrznych), jego pasmo przenoszenia, sposób odbioru oraz warunki propagacji na trasie między nadajnikiem i odbiornikiem.

Analizując wpływ bliskości Ziemi na zjawiska propagacyjne należy brać pod uwagę jej kulistość, ukształtowanie terenu, jego pokrycie oraz elektryczne parametry półprzewodzącej warstwy powłoki ziemskiej. Poza kulistością wszystkie wymienione czynniki nie są na ogół jednorodne wzdłuż całej trasy propagacji między

Pojęciem bezprzewodowe systemy łączności objęte są lokalne sieci komputerowe LAN i systemy wymiany danych komputerowych, w których wykorzystywane są małe terminale z piórami świetlnymi

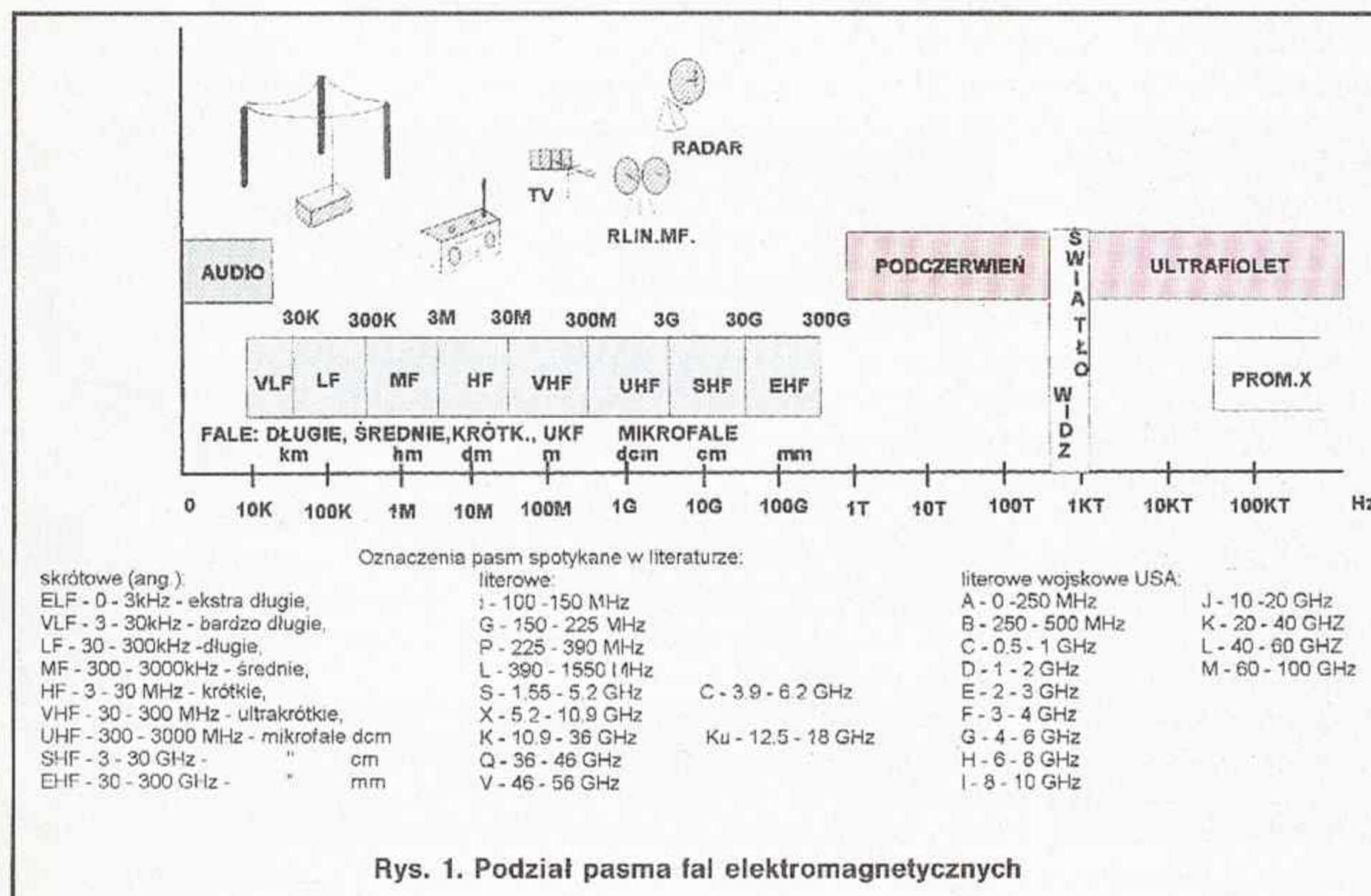
nadajnikiem a odbiornikiem radiowym, co powoduje niejednakowe nasilenie zjawisk występujących przy rozprzestrzenianiu się fal. Również nie jest jednakowy wpływ atmosfery, zwłaszcza niejednorodności przylegającej do powierzchni Ziemi i rozciągającej się do wysokości około 15 km troposfery oraz górnych, rozciągających się na wysokości od 60 do 600 km warstw jonosfery. W zależności od odległości od powierzchni Ziemi mówimy o falach przyziemnych, troposferycznych i jonosferycznych. W tablicy 1 podano sposoby rozchodzenia się fal różnych długości i zjawiska dominujące przy propagacji.

Złożoność zjawisk oraz ich zależność od częstotliwości powoduje, że nie ma jednolitego modelu propagacji fal w otoczeniu Ziemi. Na rysunku 2 przedstawiona jest klasyfikacja podstawowych modeli rozchodzenia się fal przyziemnych.

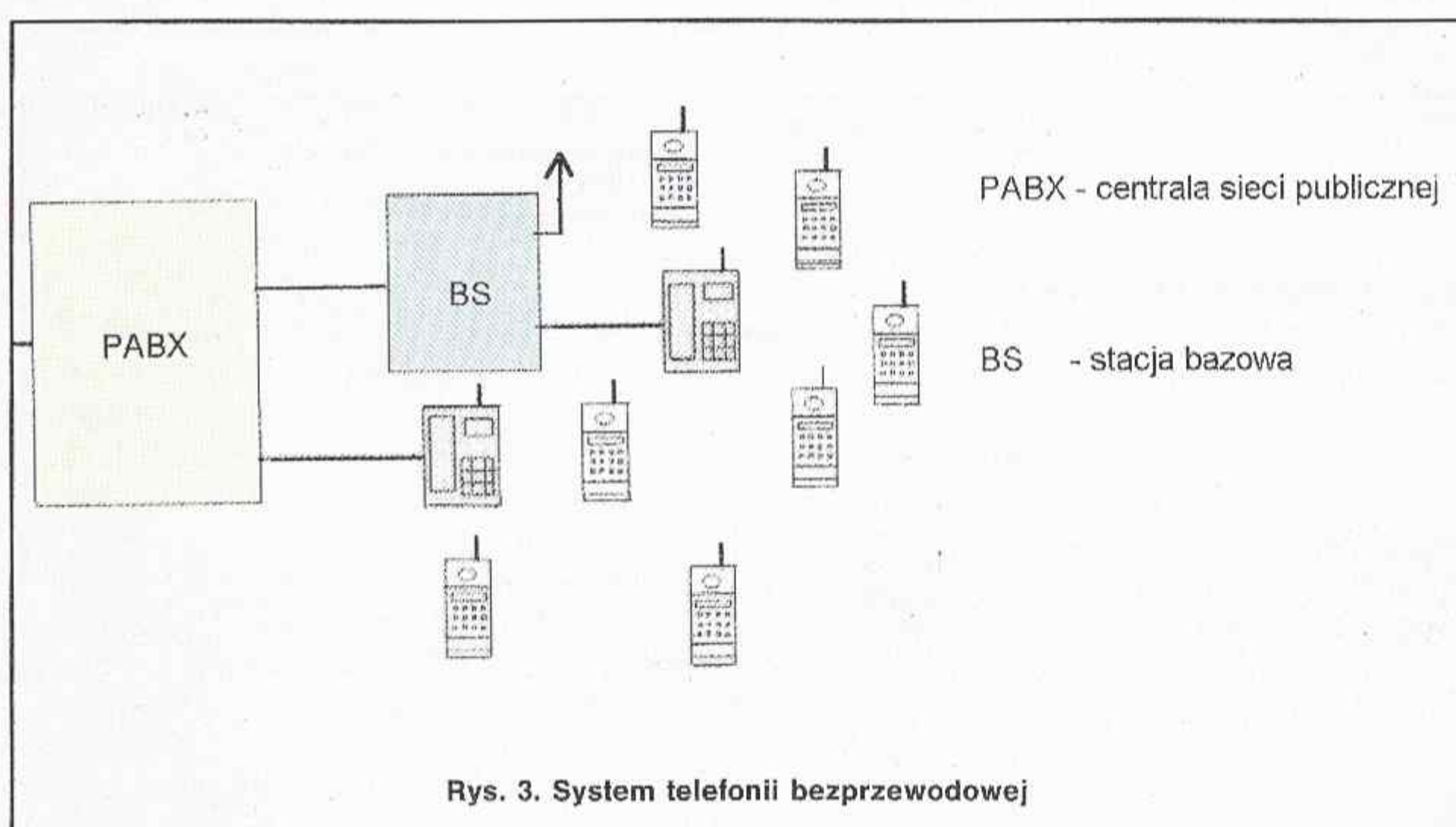
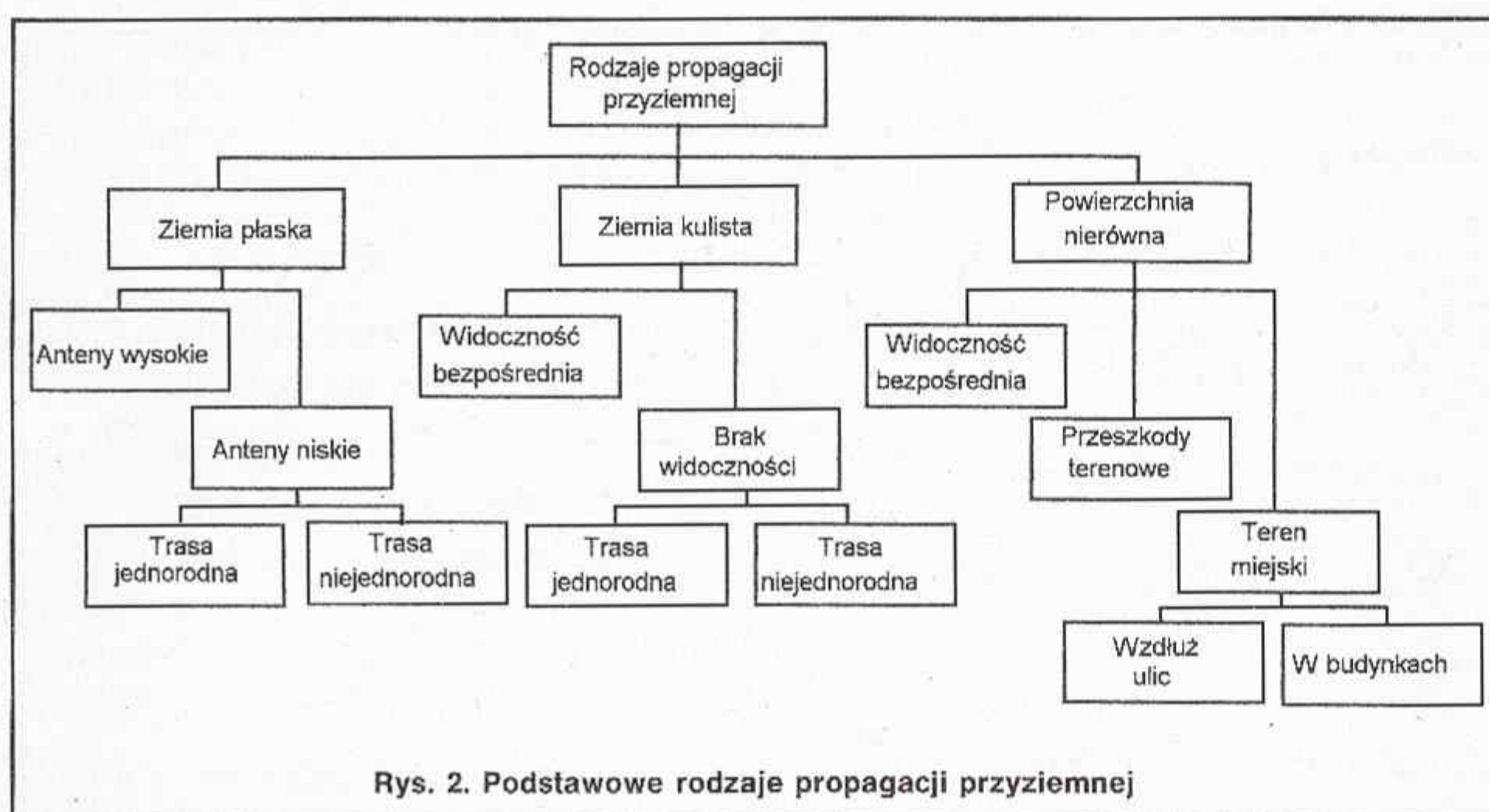
Radiokomunikacja ma zapewnić człowiekowi łączność bez krępujących go przewodów. Łączność bezprzewodową wykorzystuje się do jednostronnego rozsyłania informacji, do dwustronnej łączności między obiektami stałymi, między obiektem stałym i ruchomym, między obiektami ruchomymi, do zapewnienia dostępu do sieci przewodowej abonentowi znajdującemu się w ruchu. Każdy z wymienionych rodzajów radiokomunikacji ma swoją specyfikę określoną pojęciem służby radiokomunikacyjnej. Spośród wszystkich służb łączności radiowej, naziemnej i satelitarnej, najbardziej znane są: radiokomunikacja stała, radiokomunikacja ruchoma oraz radiokomunikacja rozsiewcza, czyli radiodyfuzja. W łączach radiowych przesyłana jest informacja foniczna (mowa, muzyka), obrazy nieruchome i ruchome, dane cyfrowe i teksty.

System radiokomunikacji ruchomej lądowej

We współczesnej radiokomunikacji coraz częściej jest wykorzystywany termin – sieci bezprzewodowe. Obecnie tym określeniem obejmuje się telefonię bezsznurową, radiowe, kom-



Rys. 1. Podział pasma fal elektromagnetycznych



Tablica 1. Sposoby rozchodzenia się fal różnych długości

Długość fali	Małe odległości		Duże odległości			
	Rodzaj fali	Dominujące zjawisko	Godziny dzienne		Godziny nocne	
			Rodzaj fali	Dominujące zjawisko	Rodzaj fali	Dominujące zjawisko
ultradługie i długie	przyziemne i jonosfer.	ugięcie, odbicie	jonosfer.	odbicie	jonosfer	odbicie
średnie	przyziemne	ugięcie	przyziemne	ugięcie	jonosfer	odbicie
krótkie	przyziemne	ugięcie	jonosfer	odbicie	jonosfer	odbicie
ukf	przyziemne	ugięcie	troposfer i jonosfer.	rozprosz. odbicie	troposfer. i jonosfer.	rozprosz. odbicie

puterowe sieci lokalne, radiowe systemy wymiany danych, systemy przywoławcze, sieci komórkowe, prywatne radiowe sieci łączności ruchomej, satelitarne sieci łączności ruchomej. Radiokomunikacja ruchoma dnia dzisiejszego przypomina różnorodny bazar z wielką różnorodnością wyposażenia technicznego, wieloma systemami, które nie mogą ze sobą współpracować. Konsument ma do wyboru urządzenia do pracy w sieciach analogowych, tzw. pierwszej generacji lub w systemach cyfrowych generacji drugiej. W tablicy 2 zamieszczono tylko wybrane przykłady istniejących i wprowadzanych systemów łączności bezprzewodowej.

Scharakteryzujemy pokrótce niektóre z wymienionych systemów.

Telefony bezprzewodowe

Telefon bezprzewodowy (rys. 3) składa się z aparatu przenośnego oraz urządzenia stacjonarnego, którym może być własny aparat stacjonarny, dołączony do centrali telefonicznej lub aparat bazowy, zainstalowany w miejscach publicznych, biurach itp. Ze względu na małe moce nadajników zasięg łączności jest niewielki do około 300 m. Pierwszymi telefonami bezprzewodowymi w Europie były analogowe urządzenia standardu CT 0 (cordless telephone). Urządzenia te

pracowały w pasmach od 1,642 do 1,782 MHz (nadajnik aparatu stacjonarnego) oraz od 47,45625 do 47,54375 MHz (nadajnik aparatu ruchomego) i miały szereg wad powodujących zakaz stosowania w wielu krajach, w tym i w Polsce. Podstawowymi wadami były łatwość podsłuchu rozmów, zakłócanie odbioru programów telewizyjnych oraz możliwość prowadzenia rozmów na cudzy koszt. Wad tych pozbawiony jest standard CT 1 dla analogowych telefonów bezsznurowych, pracujących z dupleksem częstotliwościowym z odstępem 45 MHz w pasmach od 914 do 915 MHz (aparat ruchomy) i od 959 do 960 MHz (aparat stacjonarny). System ma 40 kanałów o szerokości 25 kHz. Każda para urządzeń aparat ruchomy – urządzenie stacjonarne ma sześciocyfrowy numer przesyłany na początku rozmowy oraz regularnie w czasie jej trwania. Zapobiega to podsłuchiowaniu rozmów oraz prowadzeniu ich na cudzy koszt. Aparaty w czasie nasłuchu automatycznie poszukują wolnego kanału, każdy kanał na czas rozmowy jest blokowany. Analogowe standardy telefonów bezprzewodowych są zastępowane standardami cyfrowymi. W Europie wiele krajów wprowadziło standard CT 2 opracowany przez kilka firm Wielkiej Brytanii. Ponadto pod auspicjami Europejskiego Instytutu ds. Standardów Telekomunikacyjnych ETSI (European Telecommunications Standards Institute) rozwijany jest również cyfrowy standard DECT (Digital European Cordless Telephone). Celem normalizacji jest umożliwienie użytkownikowi aparatu przenoszenia się z obszaru działania jednej sieci telefonii bezprzewodowej do obszaru działania innej, podobnej sieci domowej, publicznej lub prywatnej. W tablicy 3 zamieszczone są podstawowe charakterystyki obydwu wyżej wymienionych standardów przeznaczonych do łączności wewnątrz budynków oraz na zewnątrz pomieszczeń.

Systemy przywoławcze

Jednokierunkowe systemy przywoławcze służą do alarmowania abonenta wyposażonego w miniaturowy odbiornik o wywoływaniu go przez użytkownika sieci przewodowej z możliwością przesyłania informacji dodatkowej, zawierającej od kilkudziesięciu do kilku tysięcy znaków. Obecnie w Polsce działa kilka odrębnych sieci przywoławczych (m.in. POLPAGER, BEL PAGETTE, TELEPAGE), różniących się oferowanymi usługami, zakresem częstotliwości pracy i zasięgiem pokrycia kraju. Podobna sytuacja panuje w większości krajów europejskich, co praktycznie uniemożliwia wywoływanie abonenta przekraczającego granice państwowe. Fakt ten, jak również wzrastająca liczba użytkowników sieci przywoławczych, a zwłaszcza gwałtowny wzrost ruchliwości wewnątrz krajów Unii Europejskiej, spowodował powstanie standardu ERMES (European Radio Messaging System) opracowanego przez ETSI. Wprawdzie 16 operatorów europejskich podpisało w styczniu 1990 roku porozumienie o wprowadzeniu systemu na początku 1993 roku, ale do chwili obecnej nie jest znana definitywna data jego uruchomienia. Sieć ERMES składa się ze (rys. 4) sterowników sieciowych SS, sterowników obszarowych SO, stacji

bazowych BS i terminali abonenckich – pagerów.

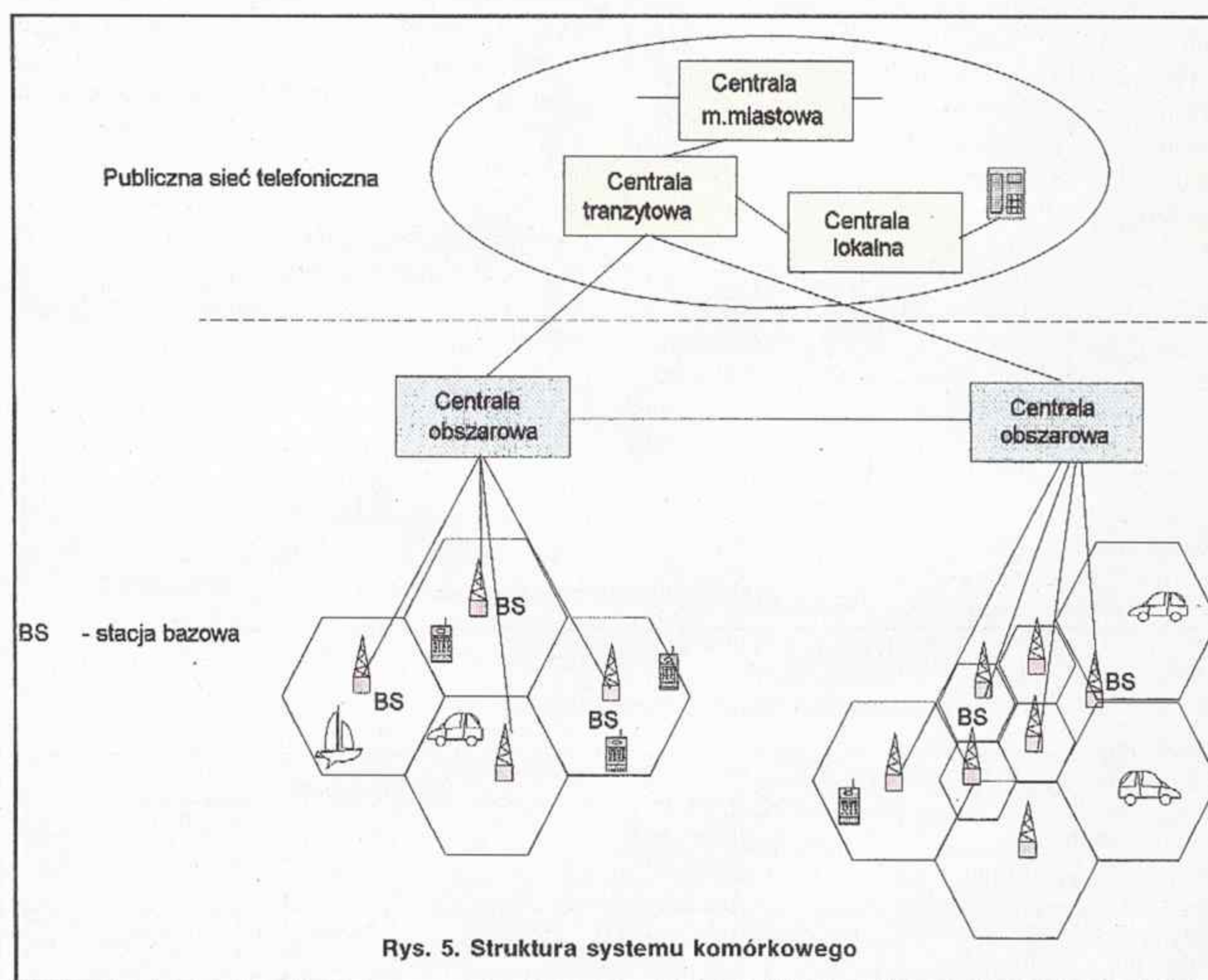
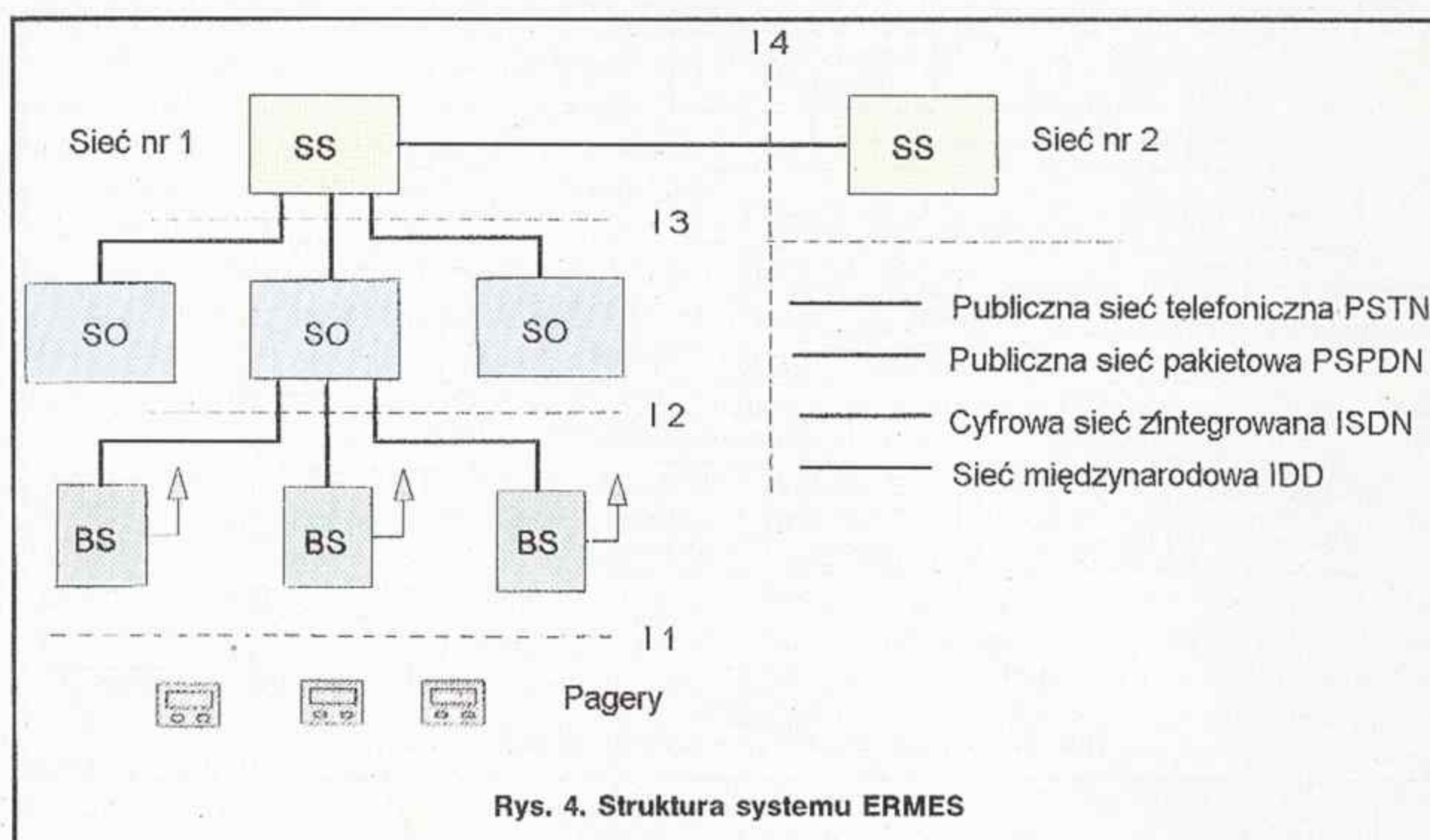
Do każdego sterownika sieciowego może być dołączonych do 64 sterowników obszarowych. Każdy sterownik obszarowy może zarządzać 128 stacjami bazowymi. Do połączenia między elementami sieci ERMES, jak również połączenia z sieciami przewodowymi są wyspecyfikowane interfejsy od I1 do I4. Połączenia między sieciami ERMES, jak również połączenia ze stacjami sieci przewodowych są realizowane za pomocą interfejsu I4. W każdym kraju do tego interfejsu może być dołączonych do 8 operatorów celem obsługi ruchu wewnętrznego. W ruchu międzynarodowym operatorzy łączą się również za pośrednictwem interfejsu I4.

Podstawowe parametry systemu ERMES są zawarte w tabeli 4. Pagery systemu ERMES mogą pracować w dwu rodzajach pracy: zamkniętym, w którym pager jest ustawiony na określony kanał oraz z poszukiwaniem, w którym pager jest przestrajany cyklicznie przez 16 kanałów systemu. System umożliwia: wywołanie tonalne, przekazywanie danych cyfrowych i tekstowych, a także powtarzanie wiadomości, sygnalizację wiadomości pilnych, przekazywanie abonenta do innego obszaru. Wdrożenie systemu jest związane z pokonaniem kilku istotnych problemów. Po pierwsze istnieje możliwość interferencji sygnałów systemu ERMES z sygnałami prywatnych radiotelefonów oraz kanałami TV zakresu 174-181 MHz. Po drugie w obszarach zabudowanych, zwłaszcza w budynkach, może nie być pełnego pokrycia obszaru, gdyż tłumienność przenikania do budynków jest w paśmie 169 MHz stosunkowo duża.

Systemy radiotelefonii publicznej

Rozwój komercyjnych systemów radiotelefonii publicznych rozpoczął się od momentu przyznania w 1938 r. przez Federalną Komisję d/s Łączności FCC (*Federal Communications Commission*) zakresu 30-40 MHz do radiokomunikacji ruchomej na terenie Stanów Zjednoczonych. Po zakończeniu II Wojny Światowej podjęto intensywne prace nad systemami zapewniającymi możliwość połączenia będącego w ruchu abonenta publicznej sieci telefonicznej. Do lat 70. ograniczeniem rozwoju tego typu systemów był brak kanałów radiowych, pomimo przyznawania kolejnych pasm 35, 150, 450 MHz. Dopiero przyznanie szerokiego zakresu fal decymetrowych, a zwłaszcza powstanie koncepcji sieci komórkowych przełamało w latach 80. bariery hamujące rozwój publicznych systemów radiotelefonii publicznej. Systemy radiotelefonii publicznej są przeznaczone do rozszerzenia usług publicznej, stacjonarnej sieci telefonicznej na abonentów ruchomych. Dlatego zasady operacyjne telefonii obowiązują radiotelefonii publiczną.

Na rysunku 5 jest przedstawiona typowa struktura systemu komórkowego, który składa się z central obszarowych, zazwyczaj połączonych z siecią publiczną poprzez jej centrale transzytowe, wielokanałowych stacji bazowych oraz radiotelefonów abonenckich. Radiotelefony są to zwykle urządzenia montowane w różnego rodzaju pojazdach (samochodach, pociągach, jednostkach pływających) oraz radiotelefony przenoszone lub osobiste o mniejszym zasięgu



działania niż stacje przewoźne, ze względu na mniejsze moce nadajników. Poszczególne elementy sieci połączone są liniami kablowymi: telefonicznymi i transmisji danych oraz kanałami radiowymi: rozmównymi i służbowymi (zgłoszeniowo-wywoławczymi). Struktura sieci radiotelefonii publicznej, rozmiary komórek, sposób promieniowania w komórce (dookólny czy sektorowy) zależą od terenu, na którym rozwinięty jest system, oraz wielkości ruchu generowanego przez abonentów na tym terenie.

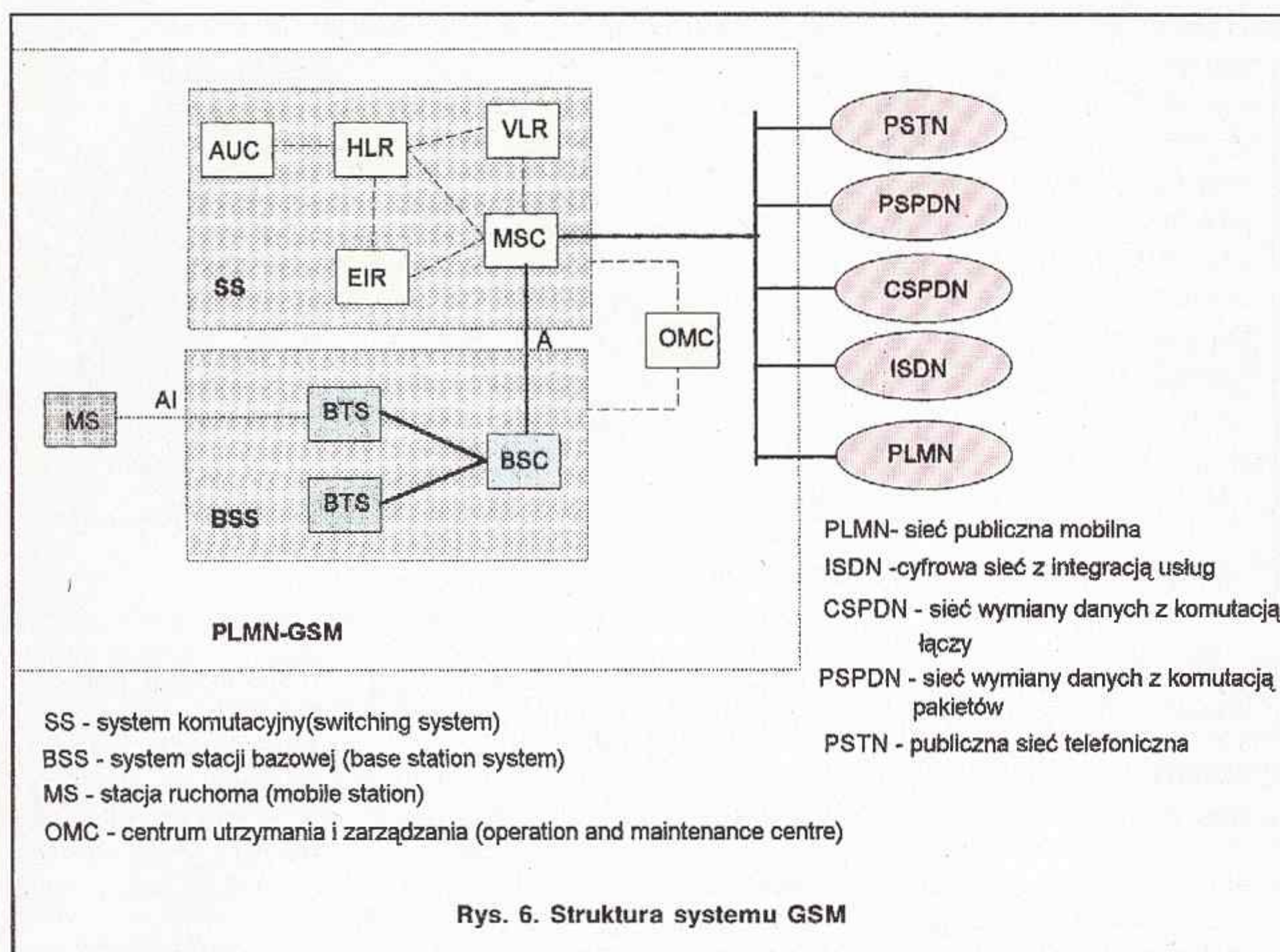
Jakość obsługi zależy od właściwego zaplanowania systemu tak, aby przy pełnym pokryciu zasięgiem, zminimalizować wzajemne zakłócenia.

Centrala obszarowa realizuje zwykle standardowe funkcje komutacyjne oraz funkcje dodatkowe, specyficzne dla sterowania systemem radiotelefonii publicznej, takie jak: przydzielanie ka-

nałów radiowych, kontrola stanu kanału i przenoszenie rozmów do innych komórek, rejestracja stacji abonenckich i rozpoznawanie uprawnień abonenta do pracy w sieci, sterowanie i nadzór nad pracą stacji bazowych, ewidencja ruchu, opłat, itp.

Stacja bazowa pośredniczy w łączeniu abonenta z siecią, realizuje odbiór i nadawanie sygnałów w kanałach radiowych, a ponadto poszukuje abonenta wywoływanego w kanałach nasłuchowych, odbiera zgłoszenia abonentów w kanałach wywoławczych, nadzoruje jakość połączeń.

Bardzo istotnymi funkcjami obsługi abonentów w publicznej sieci radiotelefonii publicznej są: lokalizacja abonentów ruchomych (z dokładnością do komórki) oraz automatyczna regulacja mocy nadajników stacji ruchomych, co zapobiega przesterowaniu kanałów odbiorczych stacji bazowej

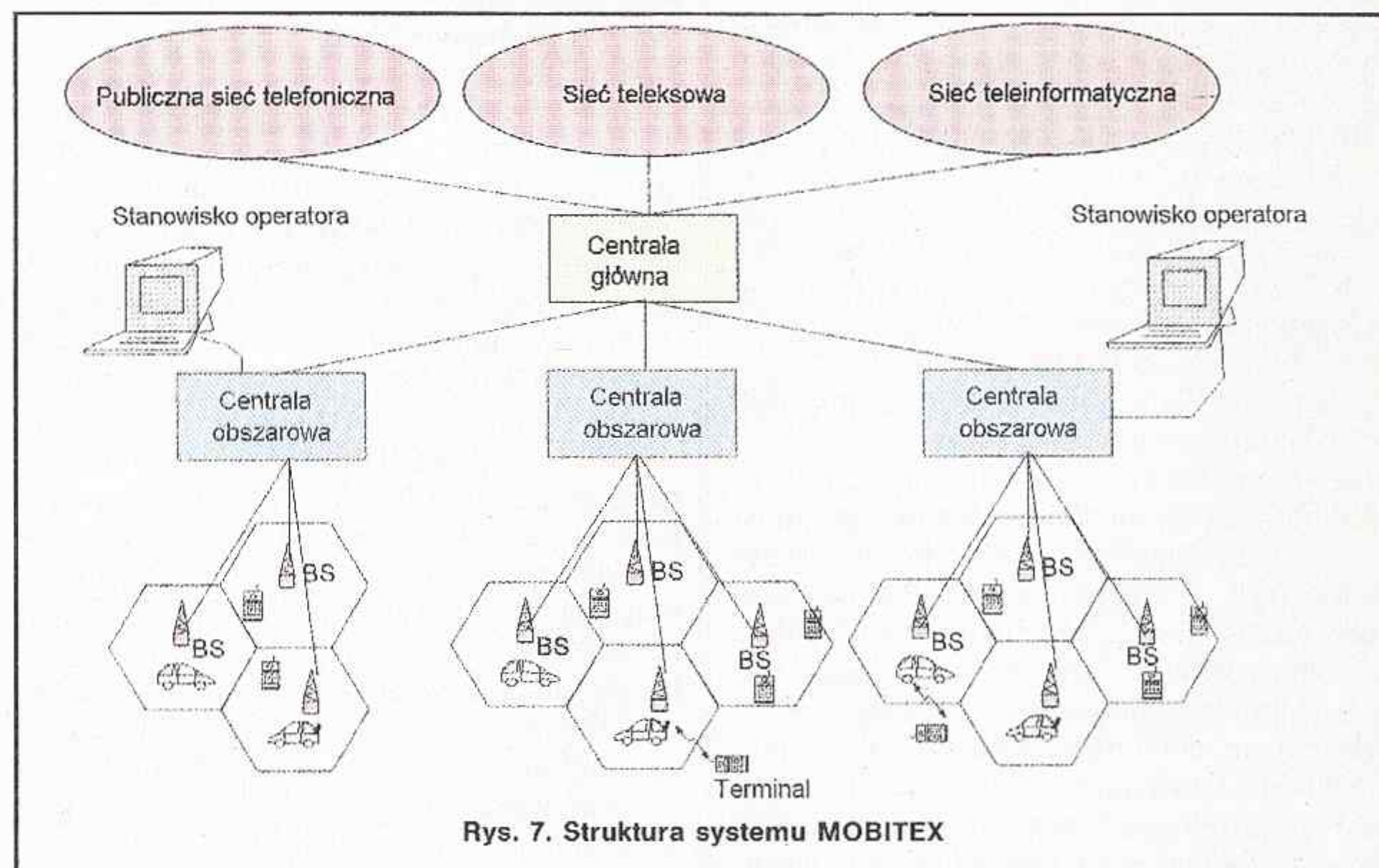


rowego przetwarzania mowy oraz technologii sieciowych. Może być on w sposób elastyczny dołączony do większości funkcjonujących sieci telekomunikacyjnych. Na rysunku 6 przedstawiona jest struktura systemu GSM. Składa się on z systemu komutacyjnego SS, systemu stacji bazowych BSS, terminali abonenckich MS oraz systemu zarządzania i utrzymania OMC. System stacji bazowych składa się ze sterownika stacji bazowych BSC (*base station controller*) oraz stacji nadawczo-odbiorczych BTS (*base transceiver station*). System komutacyjny składa się z centrali obszarowej MSC (*mobile switching centre*), rejestru abonentów obszaru HLR (*home location register*), dynamicznie zmiennego rejestru abonentów aktualnie znajdujących się w obszarze obszarów, bazy danych zawierających identyfikatory abonentów AUC (*authentication centre*) oraz bazy identyfikatorów sprzętu abonenckiego EIR (*equipment identity register*). Obszar obsługiwany przez centralę jest zbiorem komórek, w każdej z nich pracuje jedna stacja BTS. Grupa stacji BTS jest sterowana przez jeden sterownik

i zmniejszeniu czułości jej odbiornika, a co w konsekwencji mogłoby prowadzić do zrywania łączności ze stacjami, których poziom sygnału w odbiorniku stacji bazowej jest niewielki. Pomimo dość wysokich, jak na warunki polskie opłat za użytkowanie systemu i aparaty abonenckie, wzrasta liczba abonentów publicznych sieci radiotelefonicznych. W Europie, począwszy od 1988 roku średni roczny przyrost liczby abonentów szacuje się na około 1 mln. Prognozy przewidują, że w 2000 roku będzie na naszym kontynencie około 13 mln abonentów sieci analogowych oraz ponad 11 mln abonentów cyfrowego systemu GSM.

Spośród operujących systemów radiotelefonii publicznej, do najbardziej rozpowszechnionych na świecie należą:

- wśród systemów analogowych: amerykański AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*), angielski TACS (*Total Access Communication System*), skandynawski NMT (*Nordic Mobile Telephone*), ten ostatni został wprowadzony w Polsce (*Centertel*),
- wśród systemów cyfrowych: amerykański D-AMPS (*Digital AMPS*), również znany pod nazwami NADC (*Nord American Digital Communications*), USDCS (*USA Digital Communications System*), europejski GSM (*aktualnie tłumaczony jako Global System for*



Mobile Communication) oraz japoński PDC. Obecnie przez 18 krajów w Europie jest wdrażany system GSM. Przy opracowywaniu tego systemu wykorzystano najnowsze osiągnięcia nauki m.in. w zakresie technik transmisyjnych w kanałach radiowych, cyf-

BSC, którego zadaniem jest m.in. relokacja połączeń przy przekraczaniu granicy komórek oraz regulacja mocy stacji bazowych i ruchomych. Grupa sterowników BSC jest obsługiwana przez jedną centralę obszarową MSC. Centrala ta realizuje wszystkie połączenia wychodzące i przychodzące. Do rejestracji abonentów służy rejestr pierwotny HLR, a do ich lokalizacji w systemie rejestr wtórny VLR. W celu zapewnienia bezpieczeństwa łączności wprowadzono bazy identyfikatorów: abonenta AUC (zawiera również generatory kluczy szyfrujących) oraz EIR, która przeprowadza identyfikację abonenta poprzez sprawdzenie jego karty SIM (*subscriber identity module*) oraz identyfikację, czy terminal abonenta nie jest kradziony lub czy ma on homologację. Złożoność strukturalna, funkcjonalna i układowa (w stacjach abonenckich i bazowych

T a b l i c a 2. Przykłady systemów łączności bezprzewodowej

Rodzaj systemu	Przykłady
Telefon bezprzewodowy	Analogowy CT1, Cyfrowy CT2, DECT,
System przywoławczy sieć komórkowa	Wiele wewnętrznych systemów krajowych ERMES Analogowa: NMT-450, AMPS, TACS, NAMTS Cyfrowa: GSM, DCT-1800, D-AMPS, PDC
Sieć prywatna	MOBITEK, ACTIONET, TETRA
System satelitarny	EUTELTRACS, INMARSAT A, M, P, IRYDIUM, GLOBALSTER, ORBCOMM

T a b l i c a 3. Podstawowe charakterystyki standardów CT2 i DECT

Nazwa standardu	CT 2	DECT
Zakres częstotliwości	pasmo 800 MHz	pasmo 1,9 GHz
Szerokość kanału	100 kHz	2 MHz
Metoda dostępu	FDMA/TDD	TDMA/TDD
Rodzaj modulacji	GMSK	GMSK
Przepływność binarna	72 kb/s	1,152 Mb/s
Kodowanie mowy	ADPCM 32 kb/s	ADPCM 32 kb/s
Możliwość inicjowania rozmów w obu kierunkach	ograniczona	jest
Możliwość automatycznego przeniesienia rozmowy do innej stacji bazowej	brak	jest

wykorzystano techniki adaptacyjne do przetwarzania mowy, do eliminacji wpływu kanału, do minimalizacji interferencji) powodują, że system GSM jest najbardziej zaawansowanym systemem radiotelefonii publicznej na świecie.

Sieci trunkingowe

Terminem sieci trunkingowych obejmuje się szeroką klasę systemów radiokomunikacji ruchomej, począwszy od prostych radiowych sieci prywatnych i dyspozytorskich (np. miejskie sieci kierowania ruchem taksówek), po systemy profesjonalne, w tym radiowe systemy wymiany danych. Przykładem tych ostatnich jest system radioinformatyczny MOBITEK. System ten został uruchomiony w Szwecji w 1986 roku. Planowane jest jego włączenie w sieć TELBANKU.

System zapewnia integrację dwukierunkowych usług tekstowych i transmisji danych oraz automatyczny dostęp do publicznej sieci telefonicznej, telexowej i sieci teleinformatycznych. Ogólna architektura całego systemu (rys. 7) obejmuje sieć wieloszczęblową (centrum zarządzania, centrale główne, obszarowe i stacje bazowe) oraz liczne podsystemy abonenckie.

Zasadniczą cechą systemu MOBITEK jest możliwość tworzenia podsystemu użytkownika w oparciu o odpowiednie, indywidualnie dobrane wyposażenie centrum dyspozytorskiego. Zasadnicze wyposażenie centrum stanowią: monitory ekranowe, komputery osobiste oraz pulpit dyspozytorski z terminalami tekstowymi i łącznością foniczną. Centrum jest zwykle powiązane z siecią kom-

puterową i z telefoniczną centralą abonencką danego przedsiębiorstwa.

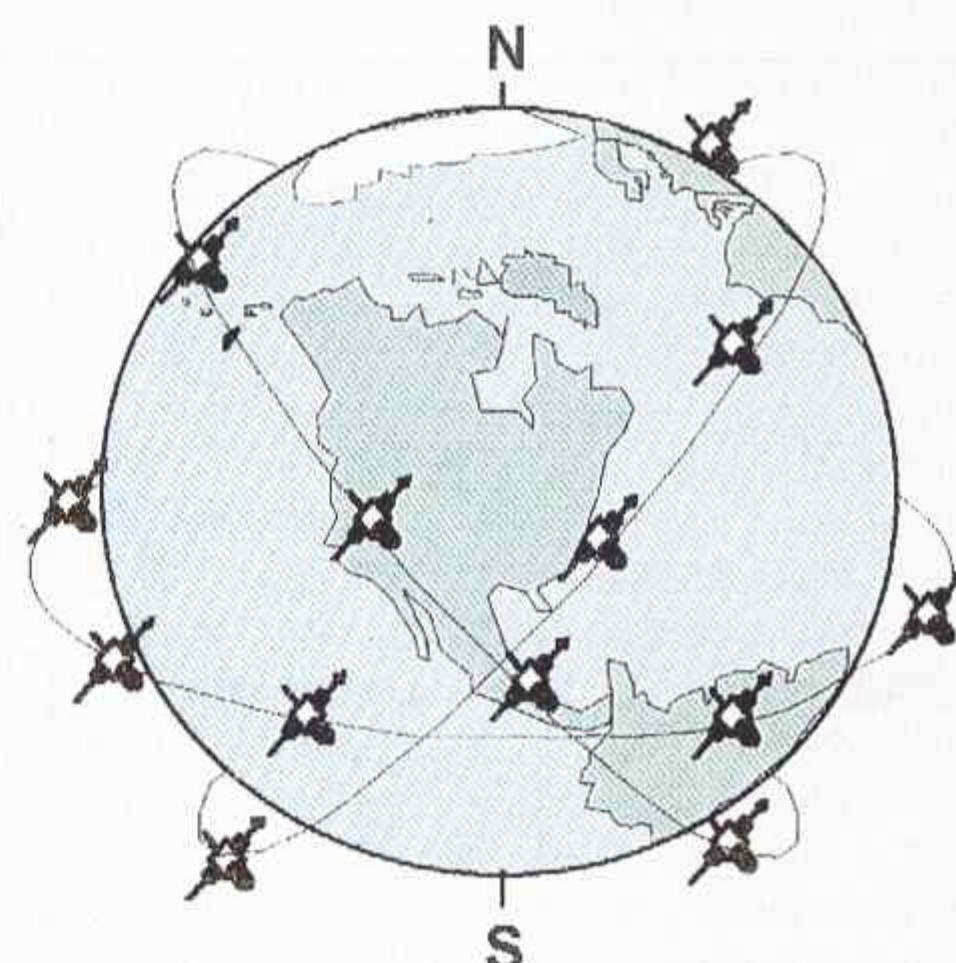
Systemy satelitarnej łączności ruchomej

Satelitarne systemy łączności można podzielić na dwie szerokie klasy: systemów z satelitami na wysokich orbitach geostacjonarnych (punkt podsatelitarny jest nieruchomy względem powierzchni Ziemi i znajduje się na równiku) oraz systemów z satelitami na orbitach niegeostacjonarnych (punkt podsatelitarny ruchomy względem powierzchni Ziemi). Orbitsy satelitów ruchomych mogą być eliptyczne lub kołowe, biegunowe lub nachylone, niskie, średnie lub wysokie. Aby uzyskać połączenie przez satelitę geostacjonarnego, należy z określoną dokładnością ukierunkować antenę stacji naziemnej na satelitę, którego położenie jest dokładnie znane. W przypadku łączności przez satelitę ruchomego, urządzenie naziemne śledzi tor jego ruchu. W koncepcjach systemów satelitarnych z dużą liczbą aparatów krążących nad Ziemią na niskich lub średnich orbitach pokrycie jej powierzchni z odpowiednią gęstością mocy umożliwia łączność bez konieczności stosowania anten kierunkowych.

W systemie geostacjonarnych satelitów Inmarsat (wersja analogowa A i wersja cyfrowa M) abonent wyposażony w lekki terminal naziemny może uzyskać dalekosiężne połączenia via kosmos poprzez stacjonarną stację naziemną, połączoną z międzynarodową siecią telefoniczną w ruchu automatycznym.

Przy wykorzystaniu satelitów nieruchomych tworzone są sieci terminali naziemnych z antenami o małej i bardzo małej aperturze tzw. sieci VSAT (*very small aperture terminal*) i USAT (*ultra small aperture terminal*). Sieci VSAT mogą mieć strukturę gwiazdową, wówczas naziemna stacja główna steruje siecią i pośredniczy w wymianie informacji między terminalami końcowymi, lub strukturą kratową – *mesh*, w której stacja główna zarządza siecią, lecz nie pośredniczy w wymianie między terminalami systemu.

Nowe koncepcje systemów satelitarnych pojawiły się na początku bieżącej dekady, należą do nich systemy: Irydium firmy Motorola, Globalstar firmy LQSS, Leocom – Italspazio, Odyssey – TRW Inc., Orbcomm – Or-



Rys. 8. Konstelacja satelitów systemu ORBCOMM

bital Science Corp. W systemach tych pokrycie powierzchni Ziemi osiąga się za pomocą od kilkunastu do kilkudziesięciu aparatów kosmicznych (12 w Odyssey, 66 w Irydium), tworzących konstelację krążącą nad Ziemią na niskich lub średnich, nachylonych orbitach kołowych, podobnie jak w systemie nawigacyjnym GPS.

W systemie Orbcomm konstelację tworzą 34 satelity (26 pracujących w sieci i 8 rezerwowych), krążące na wysokości 785 km po ośmiu kołowych orbitach nachylonych (rys. 8). W ten sposób zapewnia się dostęp do systemu w 95% czasu. Przerwy, w których żaden z satelitów nie znajduje się w polu widzenia abonenta, nie przekraczają 2 minut.

System przeznaczony jest do wymiany informacji w czasie krótkich transmisji przy bardzo małych mocach terminali naziemnych (5W), co utrudnia wykrycie i niepożądany odbiór informacji. W systemie istnieje możliwość odtwarzania informacji, która jest zapamiętywana i przesyłana do terminala tylko wówczas, gdy ma on włączone zasilanie. Zakłada się, że w systemie będzie określone miejsce położenia każdego terminala abonenckiego z dokładnością do 100 m. Do dokładniejszego określenia położenia abonenta służyć ma odbiornik systemu GPS wmontowany w stację abonencką. Zdalne aktywizowanie terminala abonenckiego i monitorowanie jego położenia umożliwia stosowanie systemu w operacjach ratowniczych i poszukiwaniach.

System Orbcomm rozpoczął swoje działanie w 1993 roku z dwoma satelitami. W jego skład wchodzi cztery rodzaje urządzeń: stacje satelitarne, stacje przęsłowe GES (*gateway earth station*), terminale abonenckie ST (*subscriber terminal*) oraz naziemne centrum kierowania siecią NCC (*network control center*). Wiadomość transmitowana z terminala abonenckiego (rys. 9) jest przekazywana za pomocą satelity do regionalnej naziemnej stacji GES, która przesyła ją za pomocą łączy satelitarnych lub dedykowanych linii naziemnych do centrum kierowania siecią NCC. NCC określa położenie odbiorcy i kieruje wiadomość do odpowiedniej GES, która ją przesyła przez satelitę do adresata. Każdy kraj, w którym wykorzystywany jest system Orbcomm może mieć swoje własne NCC i GEC, te ostatnie są zdalnie zarządzane.

T a b l i c a 4. Podstawowe parametry systemu ERMES

Zakres częstotliwości	od 169,425 do 169,8 MHz
Liczba kanałów/odstęp	16/25 kHz
Rodzaj modulacji	4 – FSK
Szybkość transmisji	6250 b/s
Pojemność systemu	32 mln abonentów w każdym kraju
Elementowa stopa błędów	2x10 ⁻⁴
Zabezpieczenie przed błędami kod cykliczny	(30, 18)
Maksymalne opóźnienie transmisji	50 s

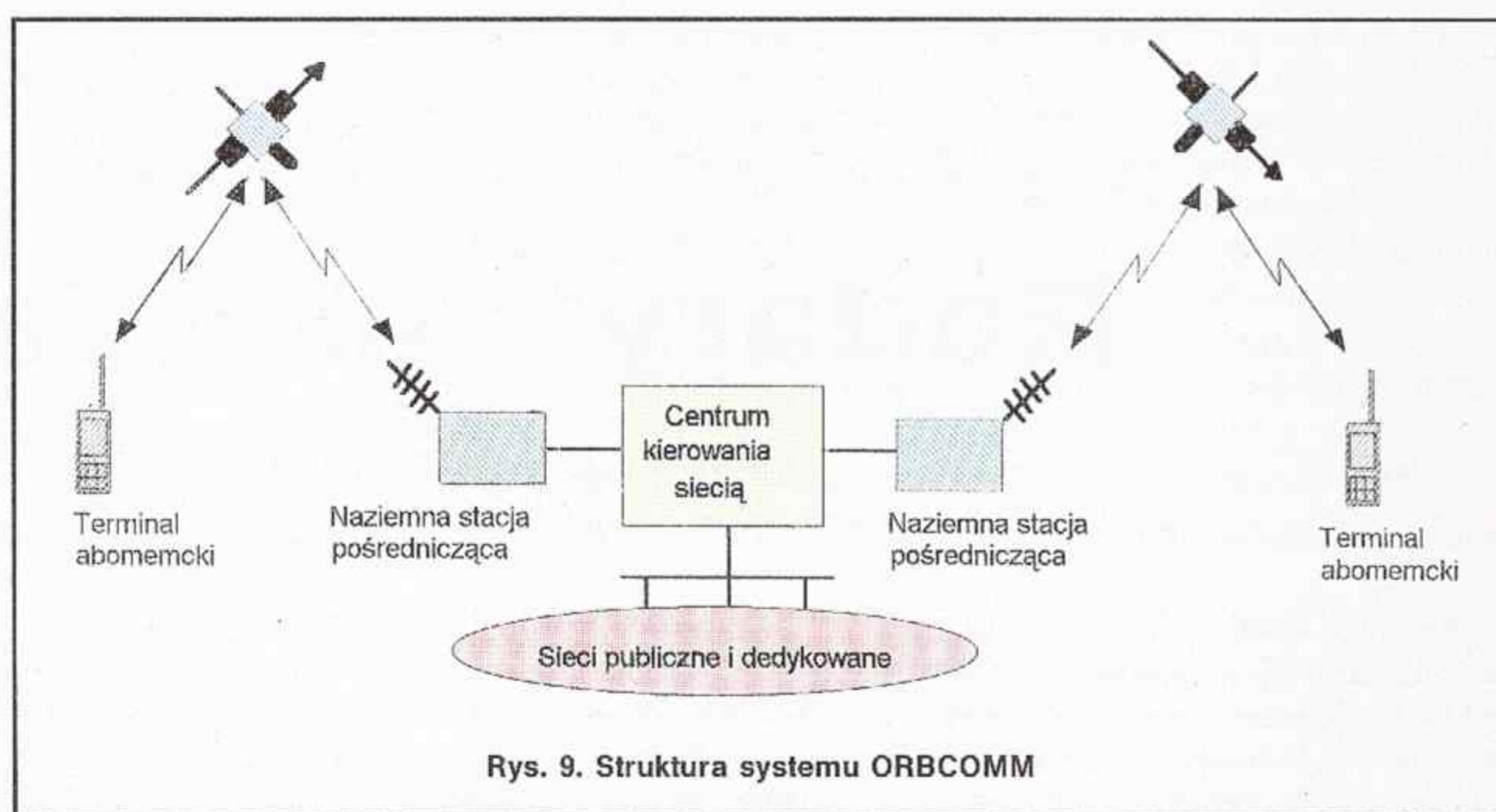
System Orbcomm pracuje w zakresie VHF w dwóch pasmach: od 137 do 138 MHz w dół do abonenta i od 148 do 150,5 MHz w górę. Satelita systemu Orbcomm wyposażony jest w 4 nadajniki radiowe: 2 VHF użytkowników, 1 VHF sterowania i 1 UHF telemetryczny oraz w 9 odbiorników VHF, z których 7 jest przeznaczonych do odbioru sygnałów od abonentów, 2 zaś do sterowania.

Stacja NCC realizuje zarządzanie siecią, sterowanie i monitorowanie stacjami GES, kierowanie wiadomości wewnątrz i na zewnątrz systemu (do współdziałających sieci telekomunikacyjnych), przekazywanie wiadomości oraz ich konwersję (formatowanie). Kieszonkowy i tani (aktualnie około 450 USD) terminal abonencki, zasilany z baterii o dużej żywotności, ma wyświetlacz ciekłokrystaliczny oraz klawiaturę. Za pomocą portu RS-232 można do niego dołączyć komputer, zewnętrzny odbiornik GPS lub inny system. Niektóre wersje aparatów ST mają wbudowane odbiorniki nawigacyjne.

Rozwój systemów radiokomunikacji ruchomej

Podstawowe kierunki rozwoju systemów radiokomunikacji ruchomej wynikają z coraz szerszego wykorzystania technik cyfrowych i zaawansowanych technologii w dziedzinach przekształcania sygnałów, kierowania funkcjonowaniem systemów (zwłaszcza obsługi ruchu) oraz z coraz częściej uświadamianej konieczności międzynarodowej standaryzacji. To technika cyfrowa umożliwiła wprowadzenie idei sieci z integracją usług. Współczesne metody przetwarzania oraz kompresji sygnałów fonicznych i wizyjnych stworzyły możliwość przesyłania w mobilnych sieciach radiokomunikacyjnych fonii o wysokiej jakości dźwięku, tekstów, obrazów nieruchomych, a w niedalekiej przyszłości również pełnoruchomych obrazów telewizyjnych (*full motion video*).

Wzrost zapotrzebowania na usługi świadczone drogą bezprzewodową, wzrost liczby abonentów i ich ruchliwości powodują konieczność wprowadzania korekt w światowym podziale częstotliwości. Współczesne



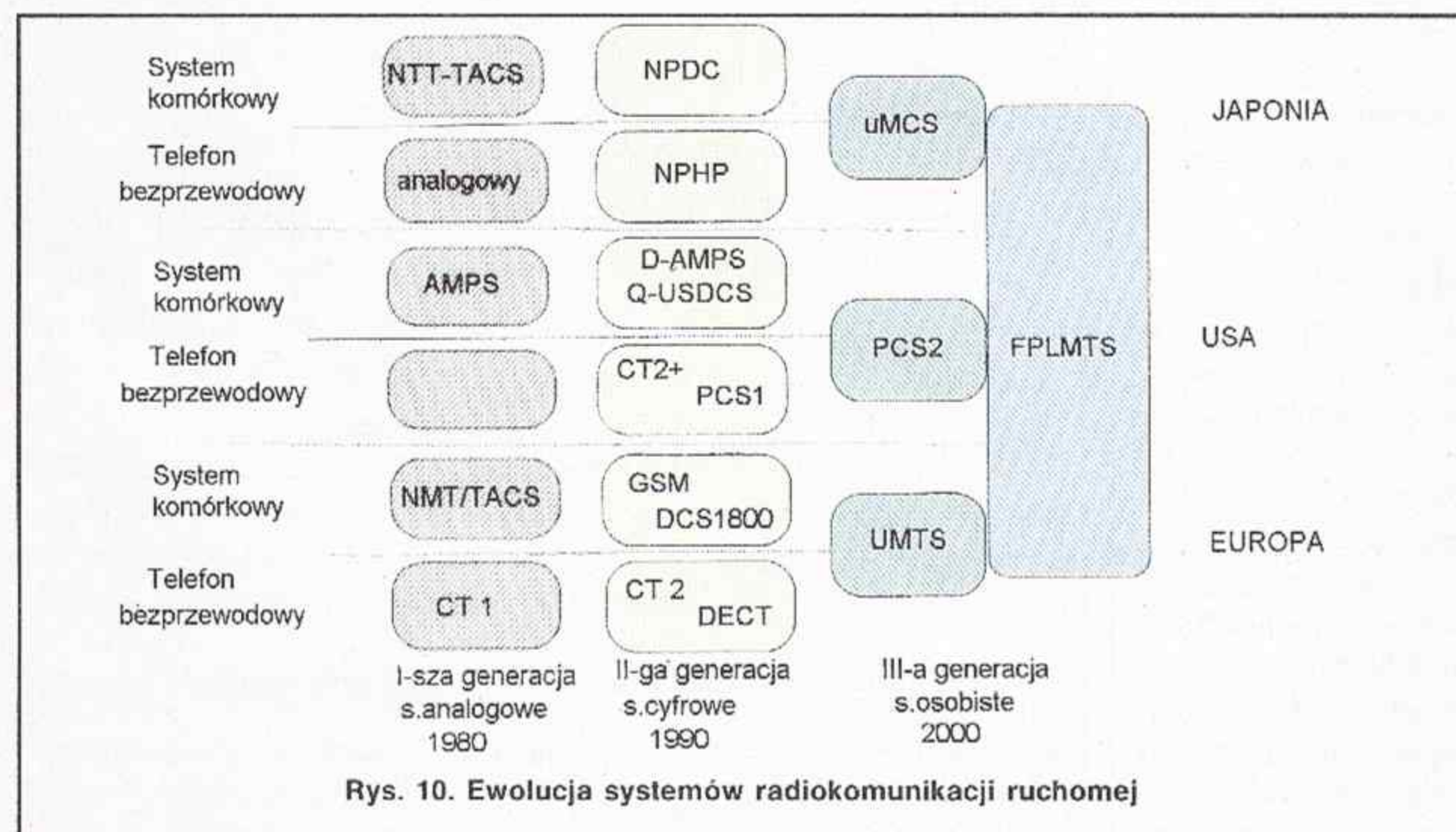
i wprowadzane w najbliższej przyszłości radiowe systemy łączności osobistej PCS (*personal communications systems*) zostały ulokowane w pasmie 2 MHz (od 1850 do 2500 kHz). Termin łączność osobista nie jest ściśle zdefiniowany, podobnie jak odpowiednie określenia PCN – sieć łączności osobistej i PCS – system łączności osobistej. Obecnie używa się tych terminów w szerokim zakresie, zarówno dla podkreślenia, że użytkownik jest właścicielem sieci, jak i w odniesieniu do określonej właściwości systemu telekomunikacyjnego obsługi terminala abonenta niezależnie od tego, gdzie się on znajduje.

Na rysunku 10 jest przedstawiona ewolucyjna droga systemów łączności ruchomej (na przykładach trzech regionów – Japonii, Stanów Zjednoczonych i Europy) od sieci analogowych w latach 80., poprzez sieci cyfrowe końca XX wieku, po sieci osobiste XXI stulecia, w którym ma powstać globalny system ruchomej radiokomunikacji lądowej – FPLMTS (*future public land mobile telecommunications system*). Termin FPLMTS został przyjęty przez Międzynarodową Unię Telekomunikacyjną ITU (*International Telecommunications Union*), podczas gdy w Europie rozpowszechniła się nazwa UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Sys-*

tem). Cechą charakterystyczną systemu FPLMTS jest zapewnienie łączności oraz dostępu do różnych usług użytkownikowi systemu, niezależnie od tego, w jakim miejscu na globie on się znajduje, za pomocą jednego, osobistego urządzenia abonenckiego.

Trudno jest dzisiaj wyrokować, jaką drogą będą ewoluować cyfrowe systemy radiokomunikacji ruchomej. Czy powstaną w wyniku rozwoju standardu GSM, którego rozwinięta wersja DCS 1800 (*digital communications system* lokowany w pasmie 1800 MHz) jest rekomendowana jako europejski standard systemów osobistych? Największa konkurencja grozi Europejczykom ze strony standardów amerykańskich: preferującego dostęp TDMA ze zwielokrotnieniem czasowym standardu IS-54, według którego rozwijana jest cyfrowa wersja systemu AMPS, oraz standardu IS-95, z metodą dostępu kodowego CDMA (*code division multiplex access*). Zgodnie z tym ostatnim firma Qualcomm rozwija swoje systemy radiokomunikacji ruchomej satelitarnej i lądowej Q-CDMA. Podstawowym kryterium wyboru standardu będzie efektywność widmowa metody dostępu mierzona gęstością obsługiwanego ruchu na jednostkę powierzchni i jednostkę pasma częstotliwości. Dotychczasowe badania metod dostępu wykazują, że największą efektywnością charakteryzuje się dostęp kodowy B-CDMA (*broadband CDMA*) z szerokopasmowym rozpraszaniem widma sygnału.

Poprzestaniemy na tej krótkiej charakterystyce systemów radiokomunikacyjnych. Szczupłe ramy artykułu nie pozwalają na omówienie innych, nie mniej ciekawych rozwiązań w systemach pracujących w zakresie fal krótkich, w systemach mikrofalowych radiolinii troposferycznych i horyzontalnych. Pominęto bardzo szerokie obszary radionawigacji (określania położenia) oraz częściowo związanej z nią problematyki radiowych systemów bezpieczeństwa ruchu pojazdów, czyli tworzenia tzw. inteligentnych systemów autostrad – IVHS (*Intelligent Vehicle Highway System*), jak też odpornych na zakłócenia, szerokopasmowych systemów radiowych, stosowanych w armiach państw wysoko rozwiniętych. Do tematyki tej powrócimy w dalszych numerach naszego pisma. □



Słowo RADAR wywodzi się z brytyjskiego *radio aids for defence and reconnaissance* – radiowe pomoce do obrony i rozpoznania lub amerykańskiego *radio detection and ranging* – wykrywanie i namierzanie za pomocą radia. Problematyką wykorzystania radarów zajmuje się radiolokacja (*radius-promień, locus-miejsce*). Pojęciem tym określa się również, zwyczajowo działania dotyczące teorii oraz konstrukcji radarów.

Radary mikrofalowe

Julian Błażej, Józef Dionizy Ponikowski

Ogólne przeznaczenie radarów wskazuje sens zdań, od których powstała ich nazwa. W początkowym okresie intensywnego rozwoju radiolokacji, to jest w czasie drugiej wojny światowej, królowała konstrukcja określana mianem "impulsowy radar aktywny z pasywną odpowiedzią". Rozwiązanie to, wielokrotnie modernizowane, jest najbardziej rozpowszechnione również obecnie. Struktura takich radarów zostanie dokładniej przedstawiona dalej. Teraz jednak posłużymy się do omówienia ich zasady działania. Tak więc, nadajnik wytwarza impulsy mikrofalowe, których zbiór za pośrednictwem anteny tworzy wiązkę przestrzenną. Może mieć ona różny kształt, zadany konstrukcją anteny i przemieszczany w przestrzeń za pośrednictwem układu antenowego. Przyjmijmy, że kształtem przypomina cygaro przeszukujące przestrzeń według zadanego algorytmu. Kiedy "cygaro", czyli wiązka antenowa, znajdzie się na celu, to na podstawie jej położenia można wyznaczyć azymut i kąt elewacji celu (obiekt wykrywany i namierzany przez radar przyjęto nazywać celem, nawet wówczas gdy jest to, np. własny samolot). Odległość wyznacza się na podstawie pomiaru czasu (jego połowy), który zużywa impuls mikrofalowy na przebycie drogi od radaru do celu i z powrotem do odbiornika radaru, po odbiciu się od celu. Korzysta się tutaj z zależności – "długość drogi to iloczyn czasu potrzebnego na jej przebycie i prędkości przebywania". Za prędkość impulsu mikrofalowego w przestrzeni przyjmuje się prędkość światła w próżni. Znajomość odległości i kąta elewacji umożliwia określenie wysokości celu. Rozpatrywany przykładowo radar może zatem wyznaczać azymut, odległość i wysokość obiektu.

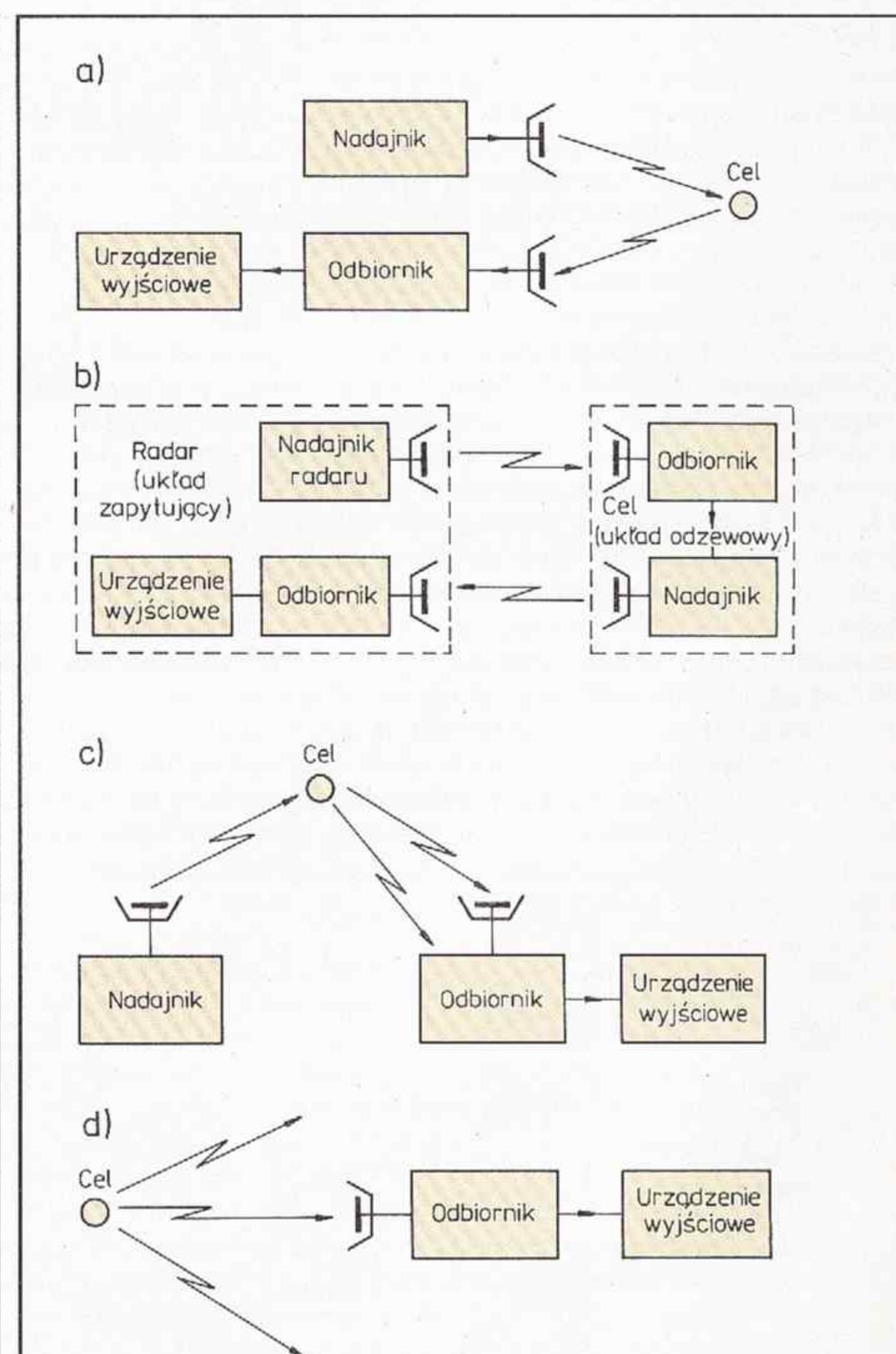
Warto wspomnieć, że sygnały mikrofalowe wysłane przez nadajnik nazywa się sygnałami sondującymi, a odbite od celu – sygnałami echa lub echem radarowym. Niniejsze rozważania dotyczą radarów mikrofalowych. Granice zakresu długości fal mają charakter umowny. Można przyjąć, że pasmo zakresu mikrofal mieści się w przedziale długości fal od 1 mm do 1 m. Głównie w tym zakresie pracują współczesne radary, przy czym największa ich liczba korzysta z fal decymetrowych i centymetrowych. Przy określaniu zakresu pracy korzysta się przemienne z pojęcia długość fali lub częstotliwość. Dla łatwego przechodzenia z jednej wielkości w drugą można posługiwać się zależnością $\lambda [m] = 300/f [MHz]$.

Podział i zastosowania radarów

Ze względu na sposób wykorzystania sygnału mikrofalowego radary można podzielić na: aktywne z pasywną odpowiedzią, aktywne z aktywną odpowiedzią, półaktywne i pasywne. Uprozczone schematy blokowe wymienionych rodzajów radarów przedstawiono na rys. 1.

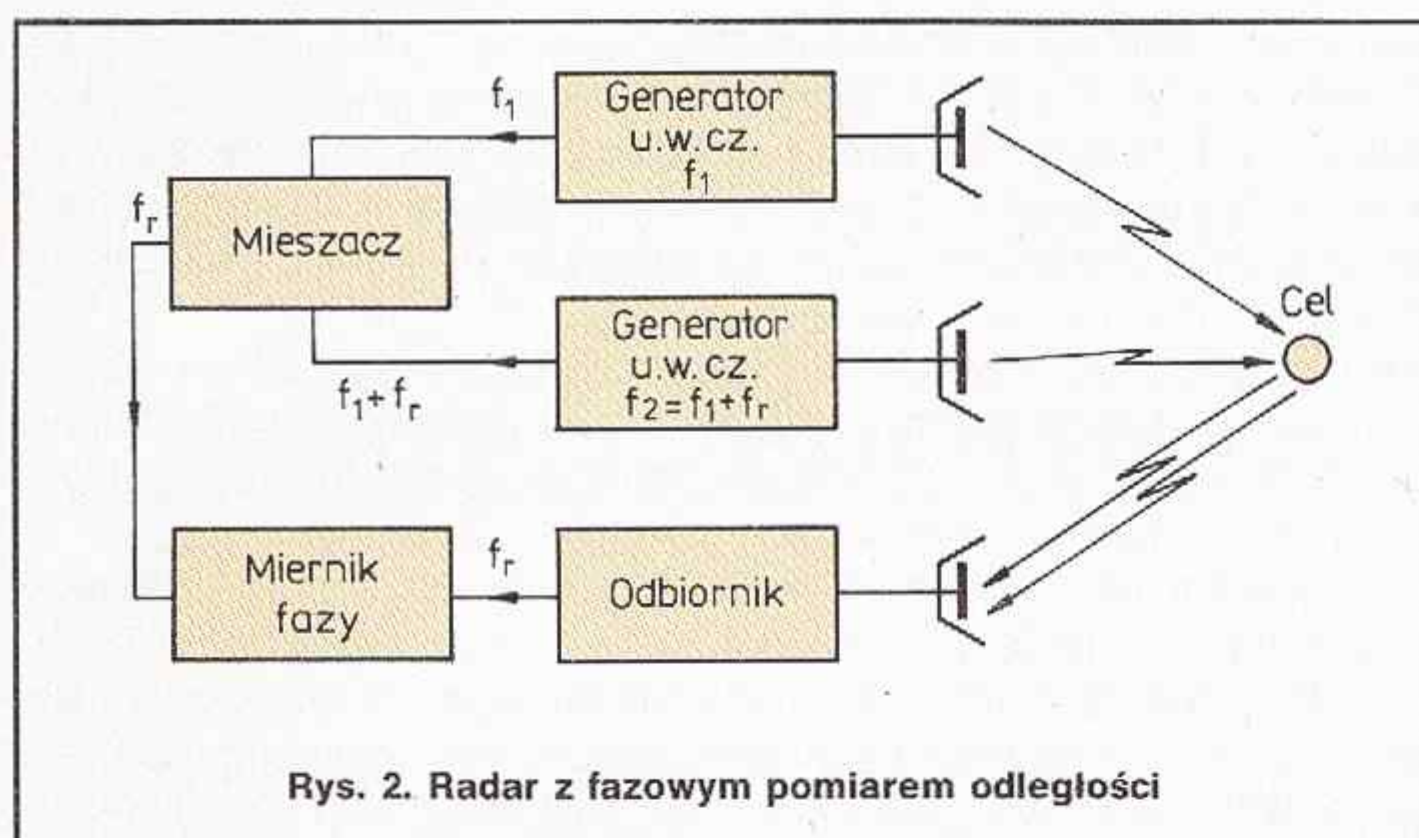
Zasadę działania **radaru aktywnego z pasywną odpowiedzią** omówiono na początku. Należy jednak zauważyć, że w radarach impulsowych wykorzystuje się najczęściej jedną antenę nadawczo-odbiorczą. Takie rozwiązanie wymaga zastosowania specjalnego przełącznika antenowego nadawanie-odbior (N-O), który podczas emitowania impulsu sondującego (znaczna moc), uniemożliwia mu przejście do odbiornika. Najczęściej urządzeniem wyjściowym jest wskaźnik oscyloskopowy, a decyzję o wykryciu celu podejmuje operator. Również operator odczytuje na wskaźniku współrzędne celu. Urządzeniem wyjściowym może być układ cybernetyczny, który przetwarza informacje o celu i wykorzystuje je, np. do sterowania artylerią przeciwlotniczą. Radary aktywne z pasywną odpowiedzią nadają się szczególnie do celów wojskowych, ponieważ do otrzymania informacji o położeniu obiektu niezbędne jest instalowanie na nim jakiegokolwiek "własnej aparatury".

Radary aktywne z aktywną odpowiedzią różni się od poprzedniego retranslacją sygnału przez pokładowe urządzenie odzwowe (rys. 1b). Urządzenie takie składa się z odbiornika, który służy do odbioru i wzmacnienia "zapytujących" sygnałów radaru oraz nadajnika wytwarzającego sygnały odzwowe. Taka konstrukcja umożliwia nie tylko pomiar współrzędnych celu, ale także jego identyfikację. Wartość sygnału odbieranego przez układ zapytujący uwarunkowana jest mocą nadajnika urządzenia odzwowego i nie zależy od właściwości zewnętrznych namierzanego obiektu. Dzięki temu uzyskuje się znacznie większe



Rys. 1. Podział radaru ze względu na sposób wykorzystania sygnału mikrofalowego

a - radar aktywny z pasywną odpowiedzią; b - radar aktywny z aktywną odpowiedzią; c - radar półaktywny; d - radar pasywny



Rys. 2. Radar z fazowym pomiarem odległości

zasięgi niż w rozwiązaniu poprzednim. Radary tego typu mogą być stosowane do:

- zdalnego sterowania obiektów o małych powierzchniach, takich jak rakiety, statki kosmiczne, sondy meteorologiczne itp.;
- identyfikacji obiektów (samolotów, okrętów) na zasadzie kodowania sygnałów odzewowych;
- obsługi systemów lotniczej i morskiej nawigacji.

W systemach lotniczej i morskiej nawigacji urządzenia retranslacyjne (odzewowe) są instalowane w wybranych miejscach jako radiolokacyjne typu radiolokacyjnego. Odpowiadają one w sposób automatyczny na sygnały zapytujące samolotów lub okrętów, umożliwiając w ten sposób określenie ich własnego położenia.

Radar półaktywny (rys. 1c) charakteryzuje się tym, że opromienianie celu oraz jego wykrycie prowadzone jest z różnych punktów. Znalazł on zastosowanie w systemach kierowania rakiet, które wyposaża się jedynie w odbiorniki sygnałów sterujących.

Radar pasywny (rys. 1d) wykorzystuje naturalne lub sztuczne promieniowanie obiektów i służy do określenia kierunku. Może być stosowany w badaniach przestrzeni kosmicznej, w systemach radiopelengacji do określania kierunku obiektów wyposażonych w nadajniki sygnałów oraz w systemach samonaprowadzania pocisków na cele promieniujące energią elektromagnetyczną.

Przedstawiona klasyfikacja radarów, ze względu na sposób wykorzystania sygnału mikrofalowego, wskazuje na znaczne możliwości użytkowe wymienionych rozwiązań, jednak ze względu na dużą liczbę zastosowań należy wyróżnić radary aktywne z pasywną odpowiedzią. Można je wstępnie podzielić według rodzaju pracy na radary z falą ciągłą oraz impulsowe.

W radarach pracujących z falą ciągłą odległość do celu określa się przy wykorzystaniu fazowej lub częstotliwościowej metody pomiaru odległości. Metoda fazowa opiera się na pomiarze różnicy faz sygnału sondującego i sygnału echa. Przykładowe rozwiązanie radaru z fazowym pomiarem odległości przedstawiono na rys. 2.

Nadajnik złożony jest z dwóch generatorów mikrofalowych pracujących na odpowiednio dobranych, stałych częstotliwościach f_1 i f_2 . Sygnały obu generatorów mają stałe amplitudy i są promieniowane przez oddzielne anteny. Sygnały echa odbierane są przez wspólną antenę odbiorczą. Na wyjściu odbiornika wydzielany jest sygnał o częstotliwości f_r równej różnicy częstotliwości $f_2 - f_1$. Sygnał ten jest następnie podawany na miernik fazy. Jednocześnie sygnały z obu generatorów są doprowadzane do mieszacza, skąd sygnał o częstotliwości f_r wchodzi na drugie wejście miernika fazy. Różnica faz Ψ obu sygnałów o częstotliwości f_r podawanych na miernik, jest proporcjonalna do odległości obiektu. Opisuje ją zależność

$$\Psi = \frac{4 \pi f_r R}{c}$$

gdzie:

R – odległość do celu,

c – prędkość światła w próżni ($3 \cdot 10^8$ m/s).

Miernik fazy może być wyskalowany w jednostkach odległości.

Radar wykorzystujący częstotliwościową metodę pomiaru odległości przedstawiono na rys. 3.

Generator mikrofalowy wytwarza sygnał ciągły, którego częstotliwość f_1 zmienia się w czasie w sposób piłokształtny. Do detektora dochodzą dwa sygnały – bezpośredni o częstotliwości f_1 i odbity od celu o takiej częstotliwości, jaką miał sygnał nadawany przed czasem $t_r = 2R/c$, czyli przed czasem przejścia nadawanego sygnału do celu i z powrotem. W detektorze wydzielą się różnicę częstotliwości F_r , która zawiera informację o odległości do celu.

Radary pracujące z falą ciągłą mogą być stosowane, np. jako urządzenia antykolizyjne, urządzenia kontroli ruchu, samolotowe radiowysokociomierze, radary meteorologiczne, policyjne mierniki prędkości, urządzenia alarmowe. Wykorzystuje się je również do celów wojskowych.

Struktura radarów impulsowych

Jak już wspomniano, impulsowe radary aktywne z pasywną odpowiedzią stanowią najbardziej rozpowszechnione urządzenia radiolokacyjne. Uproszczony schemat blokowy radaru impulsowego oraz przebiegi czasowe objaśniające jego pracę, przedstawiono na rys. 4. Impulsowy pomiar odległości polega na bezpośrednim wyznaczeniu czasu t_R przejścia impulsu mikrofalowego od radaru do celu i z powrotem. Na podstawie pomiaru tego czasu określa się odległość R do celu

$$R = \frac{ct_R}{2}$$

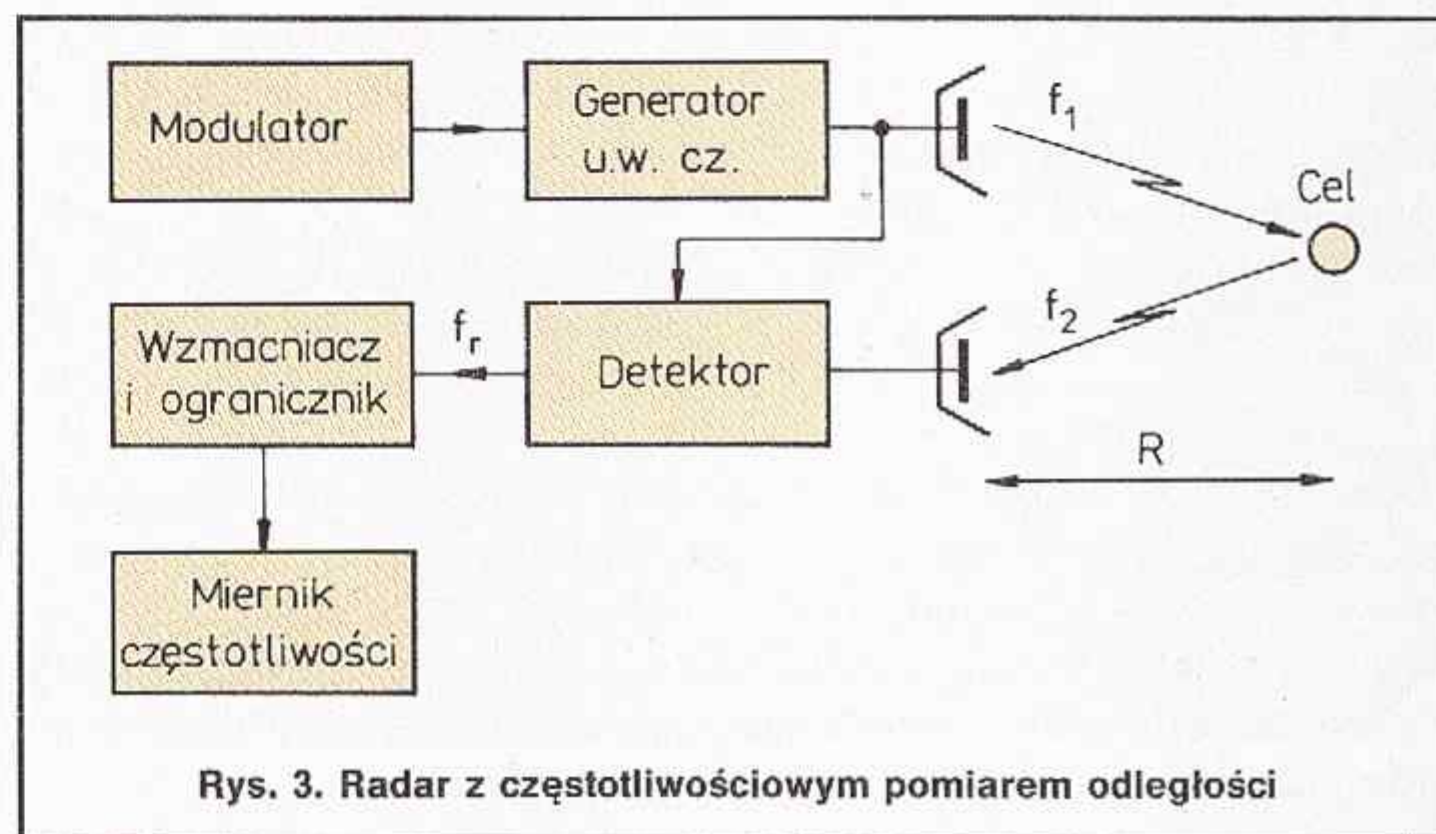
Jak można zauważyć na rys. 4, synchronizator wytwarza w każdym okresie czasu T impulsy definiujące kolejność i czas pracy poszczególnych podzespołów radaru. Impulsy te, między innymi, uruchamiają okresowo i prawie jednocześnie modulator oraz odpowiednie układy urządzenia końcowego. Zadaniem modulatora jest formowanie krótkotrwałych impulsów wysokonapięciowych, wzbudzających działanie generatora mikrofalowego. Przełącznik "nadawanie – odbiór" stanowi elektryczne połączenie wyjścia pracującego generatora i wejścia linii przesyłowej anteny. Jednocześnie izoluje on wejście odbiornika, zabezpieczając odbiornik przed przesterowaniem silnym sygnałem sondującym.

Tak więc impulsy mikrofalowe z wyjścia generatora kierowane są do anteny przez przełącznik N-O, a następnie wypromieniowane w kierunku określonym przez aktualne położenie anteny. Jeżeli na tym kierunku znajduje się cel, to nastąpi odbicie energii wypromieniowanego impulsu mikrofalowego. Po czasie t_R znikoma część tej energii (rys. 4d) zostanie odebrana z powrotem przez antenę i poprzez przełącznik N-O skierowana do odbiornika. Dzieje się tak dlatego, że przełącznik N-O w chwilę po zakończeniu generacji impulsu zmienia swoje właściwości i realizuje elektryczne połączenie anteny z odbiornikiem przy jednoczesnej izolacji nadajnika od linii przesyłowej.

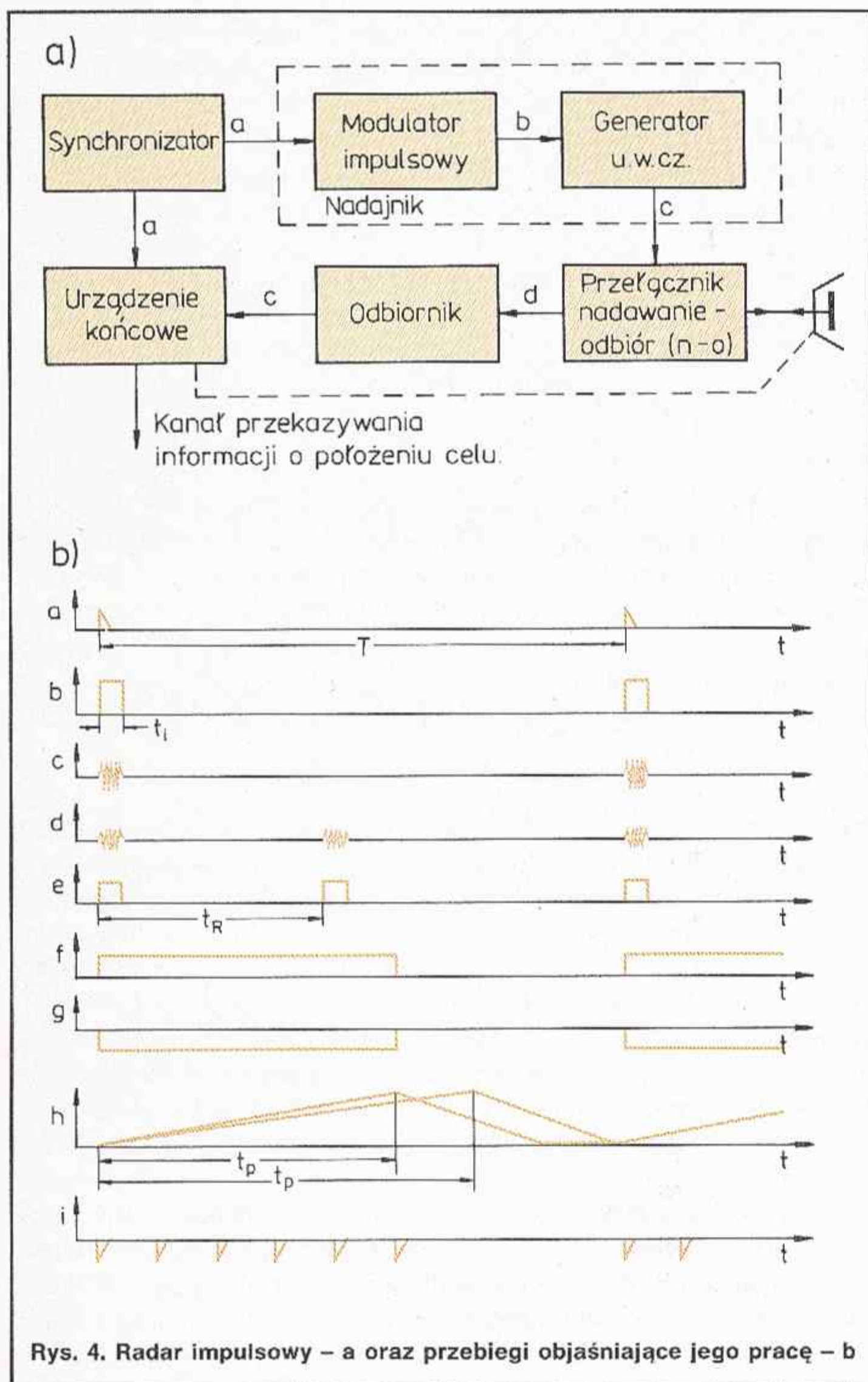
W odbiorniku następuje obróbka odbitego sygnału, tzn. wzmocnienie, przekształcenie na sygnał wizyjny (rys. 4e) i odfiltrowanie zakłóceń, których widmo nie pokrywa się z widmem sygnału odbitego. Tak przygotowane sygnały, zawierające informacje o istnieniu i współrzędnych celu, są przekazywane do urządzenia końcowego.

Urządzenia końcowe można podzielić na dwa podstawowe typy:

- urządzenia końcowe, które przedstawiają informacje opracowane przez radar w sposób dostosowany do bezpośredniego odczytu przez



Rys. 3. Radar z częstotliwościowym pomiarem odległości



Rys. 4. Radar impulsowy – a oraz przebiegi objaśniające jego pracę – b

człowieka. Są to różnego rodzaju wskaźniki radiolokacyjne, – urządzenia końcowe samodzielnie podejmujące decyzję o istnieniu i współrzędnych celu. Przekazują one wypracowane informacje do użytkownika, będącego najczęściej innym urządzeniem, spełniającym określone zadanie w stosunku do wykrytego i śledzonego przez radar celu.

Bardzo rozpowszechnionym typem urządzenia końcowego jest radarowy wskaźnik panoramiczny o zobrazowaniu jaskrawościowym, tzn. wskaźnik typu P (rys. 5).

Generator impulsów prostokątnych, sterowany przez synchronizator, wytwarza podświetlające impulsy dodatnie oraz impulsy ujemne służące do wzbudzenia generatora prądowej podstawy czasu oraz generatora znaczników odległości (rys. 5, rys. 4b). Wyjście generatora prądowej podstawy czasu połączone jest w najprostszym przypadku z ruchomymi cewkami odchylenia radialnego, osadzonymi na szyjce lampy oscyloskopowej.

Cewki te wirują synchronicznie z anteną i w ten sposób wiruje promieniowa linia utworzona na ekranie, wskutek działania prądowej podstawy czasu na strumień elektronów. Jest to linia podstawy czasu odległości.

Po zapewnieniu zgodnej orientacji cewek z anteną, promieniowa linia podstawy czasu wyznacza bieżący azymut elektrycznej osi anteny. Jeżeli antena ma wąską charakterystykę kierunkową w płaszczyźnie poziomej, to kiedy cel lub cele znajdują się w strefie wiązki antenowej, sygnały odbite pojawiają się na ekranie w formie jasnych łuków. Te jaskrawe łuki nazywa się znacznikami celów. Ich oddalenie od środka wskaźnika jest proporcjonalne do odległości celów, a kątowe położenie podstawy czasu

dostarcza informacji o azymucie.

Doprowadzone do katody lampy impulsy ujemne stałych znaczników odległości, tworzą na linii podstawy czasu serię jasnych punktów, które w trakcie wirowania podstawy czasu kreślą koncentryczne kręgi, umożliwiające odczyt odległości. Azymut odczytuje się według podziałki na obwodzie lampy oscyloskopowej.

Kręgi stałych odległości, jak również znaczniki celów, dzięki bezwładności świetlnej ekranu widoczne są przez czas dłuższy niż wynosi okres jednokrotnego obrotu anteny. Pozwala to na wyznaczenie współrzędnych dużej liczby obiektów w dowolnym momencie czasu.

Radar o przedstawionej strukturze dostarcza współrzędnych w układzie biegunowym (odległość, azymut) i dlatego obraz na ekranie lampy stanowi rodzaj mapy (o określonej skali) obszaru ograniczonego maksymalną odległością wybranego zakresu oraz pełnym kątem azymutalnym ($0-360^\circ$). Charakterystykę antenową tego radaru w przekroju pionowym można sobie w przybliżeniu wyobrazić jako powierzchnię prostokąta o określonej grubości, obracającą się wokół pionowego boku w zakresie kąta pełnego.

Impulsowe radary aktywne z pasywną odpowiedzią, w zależności od przeznaczenia, mogą mieć różne rozwiązania. Są one tak rozpowszechnione, że niekiedy właśnie z nimi utożsamia się radiolokację.

Rozwiązania perspektywiczne

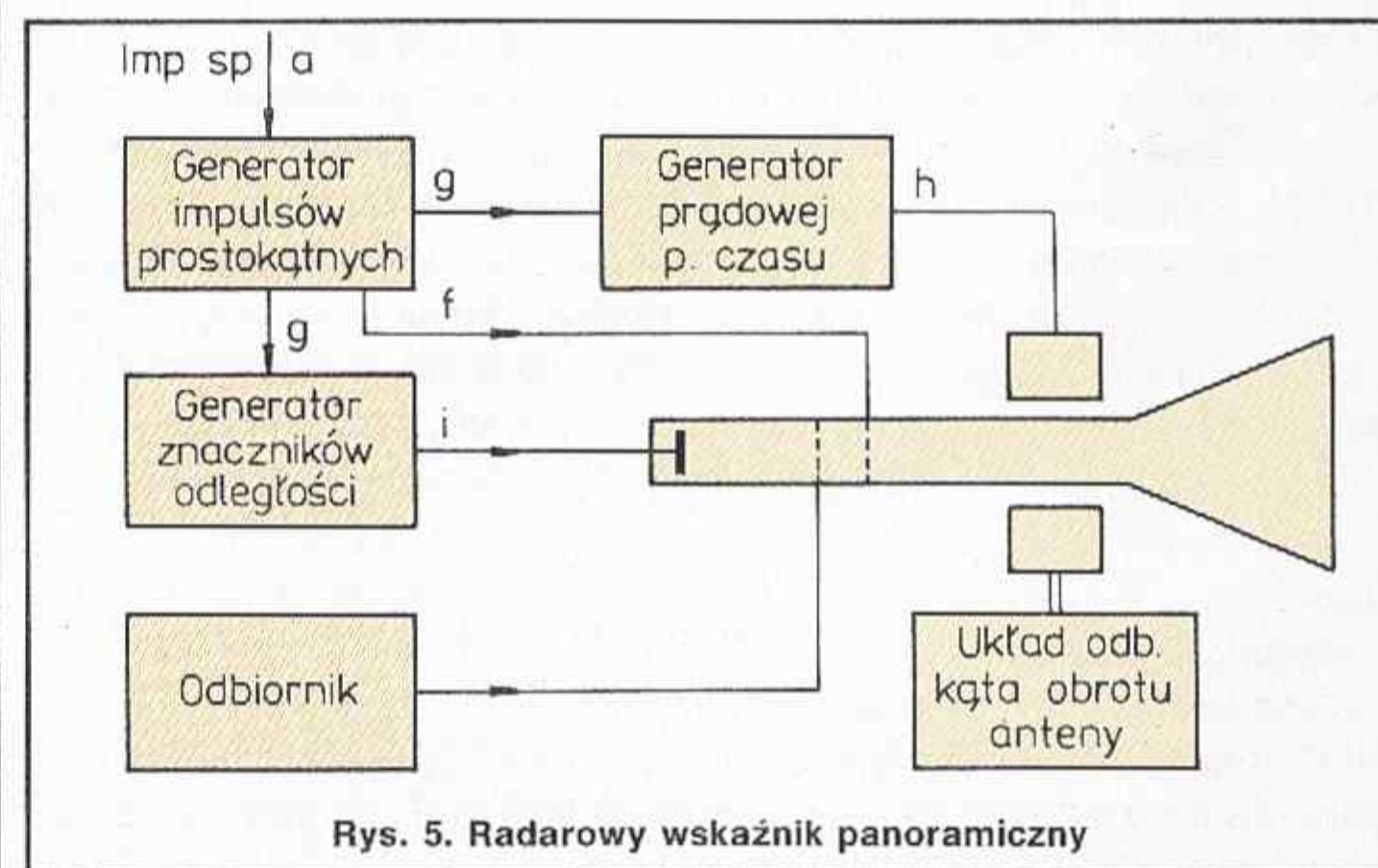
Rozwój radiolokacji wiąże się z rozwojem wielu dziedzin nauki i techniki, można jednak hasłowo wskazać perspektywy. Dotyczą one w szczególności metod i technik: przeszukiwania przestrzeni, sterowania parametrami sygnałów sondujących oraz obróbki sygnałów (filtracji zakłóceń). W zakresie przeszukiwania przestrzeni proponuje się elektroniczne sterowanie położeniem wiązki, a więc stosowanie anten bezinercyjnych. Są to najczęściej tzw. szyki antenowe, czyli elementy promieniujące rozmieszczone w przestrzeni, do których sygnały doprowadza się z centralnego nadajnika radaru, a kształt charakterystyki antenowej i jej przemieszczanie realizuje się na drodze manipulowania fazą tych sygnałów, za pośrednictwem komputerów.

W przyszłości szyki antenowe mogą być tworzone z licznych zbiorów miniaturowych generatorów półprzewodnikowych. Tak więc antenę przyszłości można sobie wyobrazić, np. w postaci warstwy scalonej naniesionej na powierzchnię statku kosmicznego, która obsługuje radar pokładowy tegoż obiektu podczas nadawania i odbioru.

Jeżeli chodzi o sterowanie parametrami sygnałów sondujących dotyczyć ono może: ich struktur, mocy, czasów trwania oraz częstotliwości powtarzania.

Trwają również prace nad doskonaleniem układów obróbki sygnałów. Na przedstawionych w artykule schematach proces ten wiąże się z doskonaleniem struktury bloków odbiornika. Obecnie stosowane są metody cyfrowej obróbki sygnałów, systematycznie udoskonalane wraz z rozwojem informatyki oraz matematyki stosowanej. Prowadzone są także prace polegające na przetwarzaniu sygnałów mikrofalowych w strukturach optyki zintegrowanej.

Urządzenia końcowe przekształca się tak, żeby w procesie wykrywania, pomiaru parametrów oraz opracowywania i wykorzystania informacji od wielu celów przy udziale dużej liczby radarów – wyeliminować udział człowieka.



Rys. 5. Radarowy wskaźnik panoramiczny

Oko ludzkie ewolucyjnie dostosowało się do odbioru promieniowania, głównie odbijanego, od najsilniejszego "reflektora" w naszym otoczeniu – Słońca (ok. 6000K). W relatywnie niskich temperaturach pokrycia powierzchni Ziemi maksimum emisji promieniowania przesunęło się w zakres podczerwieni. Przykładowo, dla typowej temperatury 300K (ok. 27°C) największa emisja energii (ilość fotonów) zachodzi dla długości fali 9,7 mikrometra. Nasze zmysły odbierania ciepła i widzenia bezpośredniego są zbyt mało czułe do detekcji tego promieniowania...

Zobrazowania w podczerwieni

Piotr Pręgowski

Zobrazowania promieniowania podczerwonego stanowią szczególnie szybko rozwijaną dziedzinę fotoniki (lub wg "klasycznego" nazewnictwa "optoelektroniki obrazowej"). Staje się to oczywiste, gdy zestawimy bogactwo informacji, jakich doznajemy wykorzystując tzw. przedział widzialny fal elektromagnetycznych ($0,4 \mu\text{m}$ - $0,7 \mu\text{m}$), z niewspółmiernie szerszym obszarem zakresu podczerwieni ($0,7 \mu\text{m}$ - $1000 \mu\text{m}$).

Liczba współczesnych zastosowań ww. zobrazowań sięga setek i odpowiada im duża liczba specyficznych technik badawczych, dlatego dalej mamy tylko próbę klasyfikacji najpopularniejszych metod.

Ze względu na ograniczoną przepuszczalność atmosfery do najczęściej wykorzystywanych subzakresów podczerwieni należą: $0,7$ - $1,0 \mu\text{m}$, $1,2$ - $1,3 \mu\text{m}$, $1,5$ - $1,8 \mu\text{m}$, $2,1$ - $2,5 \mu\text{m}$, 3 - $5 \mu\text{m}$, 8 - $13 \mu\text{m}$. Fale dłuższe są na razie mniej wykorzystywane. W wymienionych przedziałach zawiera się zasadnicza część energii wypromieniowywanej przez naturalne i "sztucznie wytworzone" otoczenie człowieka.

Przesłanką wyboru metody teledetekcji jest znajomość wzajemnych relacji pomiędzy poszukiwaną informacją, a określonymi cechami tej informacji - a przy tym dają się wyrazić w postaci obrazu. Tego typu obraz, jako całkowicie umowne odzwierciedlenie, np. niedostrzegalnych okiem procesów, może być "odczytany" i oceniony tylko przy znajomości zasad jego powstawania.

Poszukiwane informacje są z reguły w jakiś sposób związane z jednym lub kilkoma parametrami (charakterystykami) opisującymi obiekt badań:

- temperaturą - T ,
- emisyjnością lub absorpcją promieniowania podczerwonego - e ,
- odbijalnością promieniowania podczerwonego - r ,
- przepuszczalnością promieniowania podczerwonego - t ,
- rozkładem powierzchniowym ww. cech.

O wartości chwilowej, jak i charakterystykach ww. czynników decydują zazwyczaj takie cechy, jak:

- typ materii, jej budowa i stan,
- jednorodność cech fizyczno-chemicznych,
- rodzaj i wielkość wymuszeń zewnętrznych i wewnętrznych,
- warunki wymiany energii z otoczeniem,
- warunki przenoszenia i detekcji sygnałów promiennych.

Proces diagnozy na podstawie obrazu zwykle wymaga odpowiedniej znajomości wpływu na sygnały promienne takich cech obiektu badań, jak:

- przewodnictwo cieplne i elektryczne,
- pojemność cieplna,
- charakter selektywności widmowej cech promiennych.

Stosowane metody podzielić możemy na tzw. metody bierne, związane z brakiem zewnętrznego "oświetlacza", metody półaktywne, kiedy "oświetlacz" występuje w sposób naturalny oraz metody aktywne wymagające "oświetlacza" o specjalnych cechach. Pojęcie "oświetlacz" jest tu czysto umowne i dotyczyć może różnych źródeł wymuszających. Mogą to być zarówno lampy grzewcze, jak i lasery czy też wymuszenia elektryczne, mechaniczne, chemiczne itp.

Inny z podziałów dotyczy, np. sposobu pozyskiwania informacji. Do klasycznych technik badań obrazów stacjonarnych doszły techniki badań procesów cyklicznych (synchroniczne oraz typu "lock-in"), jak i techniki badań wypowiedzi na jednorazowe wymuszenia, czy też techniki badań porównawczych ("stosunkowe" oraz na bazie wzorców).

Umowny podział zobrazowań na dokonywane w podczerwieni bliskiej (do $1,5 \mu\text{m}$) i podczerwieni dalszej (średniej: do $5 \mu\text{m}$, dalekiej: do $14 \mu\text{m}$ i bardzo dalekiej) ma swoje uzasadnienie w różnicy zjawisk fizycznych,

wykorzystywanych do potrzeb obserwacji, jak i odmienności materiałów stosowanych w aparaturze pomiarowej, czy też obserwacyjnej:

- "widzenie" naturalnie oświetlonej scenerii w podczerwieni bliskiej opiera się na zróżnicowaniu cech odbicia i absorpcji promieniowania źródeł zewnętrznych (z wyjątkiem badań selektywnej emisji diod, laserów, specjalnych promienników jak również badań obiektów o bardzo wysokiej temperaturze),

- "widzenie" w zakresie podczerwieni dalszej nazywane jest często termalnym (np. zobrazowania termalne), gdyż podstawowym sygnałem w grupie, dochodzących do przetwornika promieniowania, jest zazwyczaj promieniowanie własne obiektu (tzw. promieniowanie temperaturowe). Ponadto zakres ten wykorzystują także inne techniki zobrazowania, np. bazujące na analizie cech selektywnej absorpcji - czy też rozproszenia (np. wykrywanie - obrazy gazów).

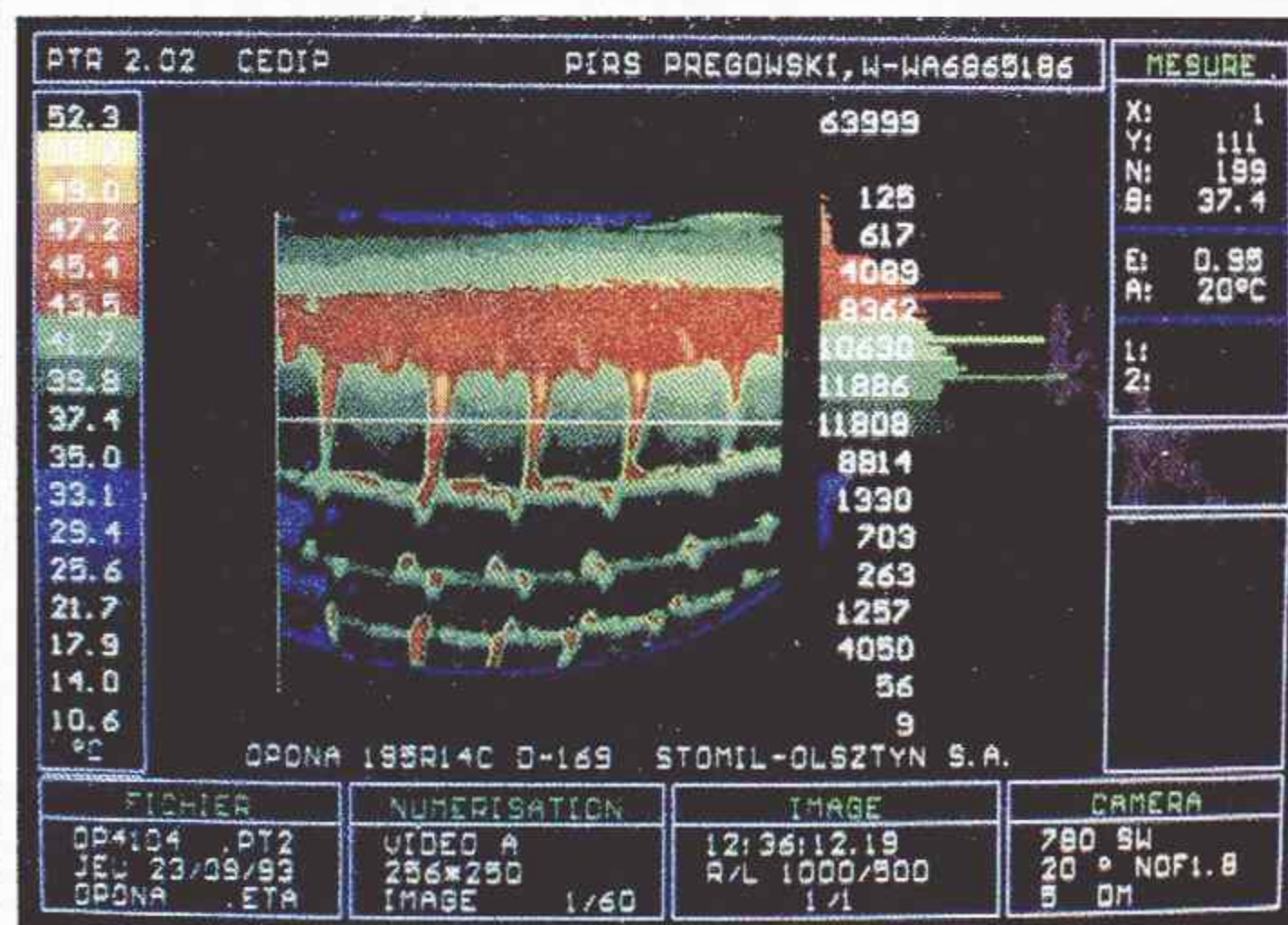
Obrazowe metody diagnostyczne w podczerwieni wykorzystują zróżnicowanie odbieranych sygnałów zarówno w widmie, jak i w rozkładach powierzchniowych oraz w czasie. Służą do badań jakościowych, lub ilościowych, dokonywanych dorywczo, okresowo lub w sposób ciągły.

Zobrazowania w zakresie bliskiej podczerwieni

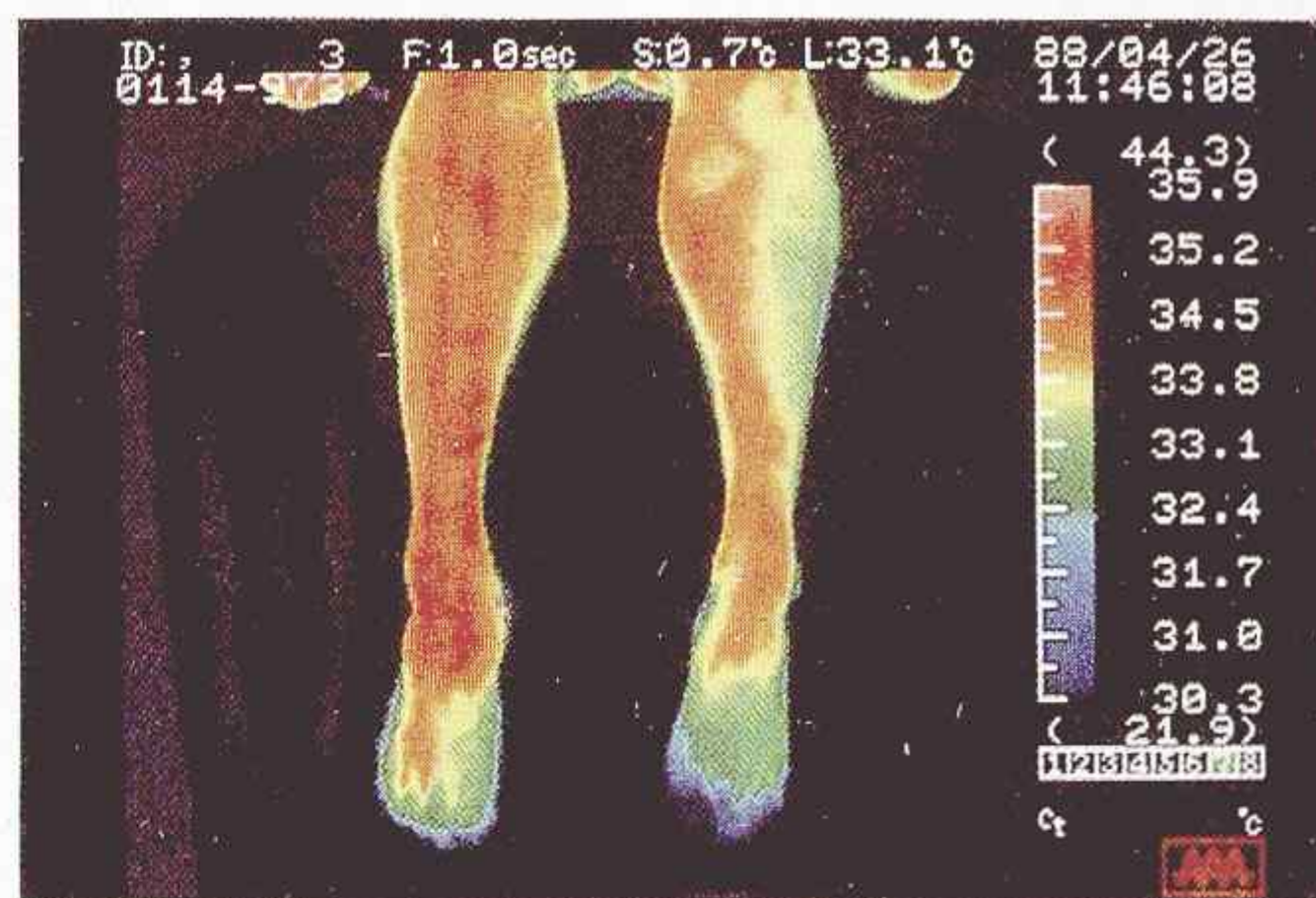
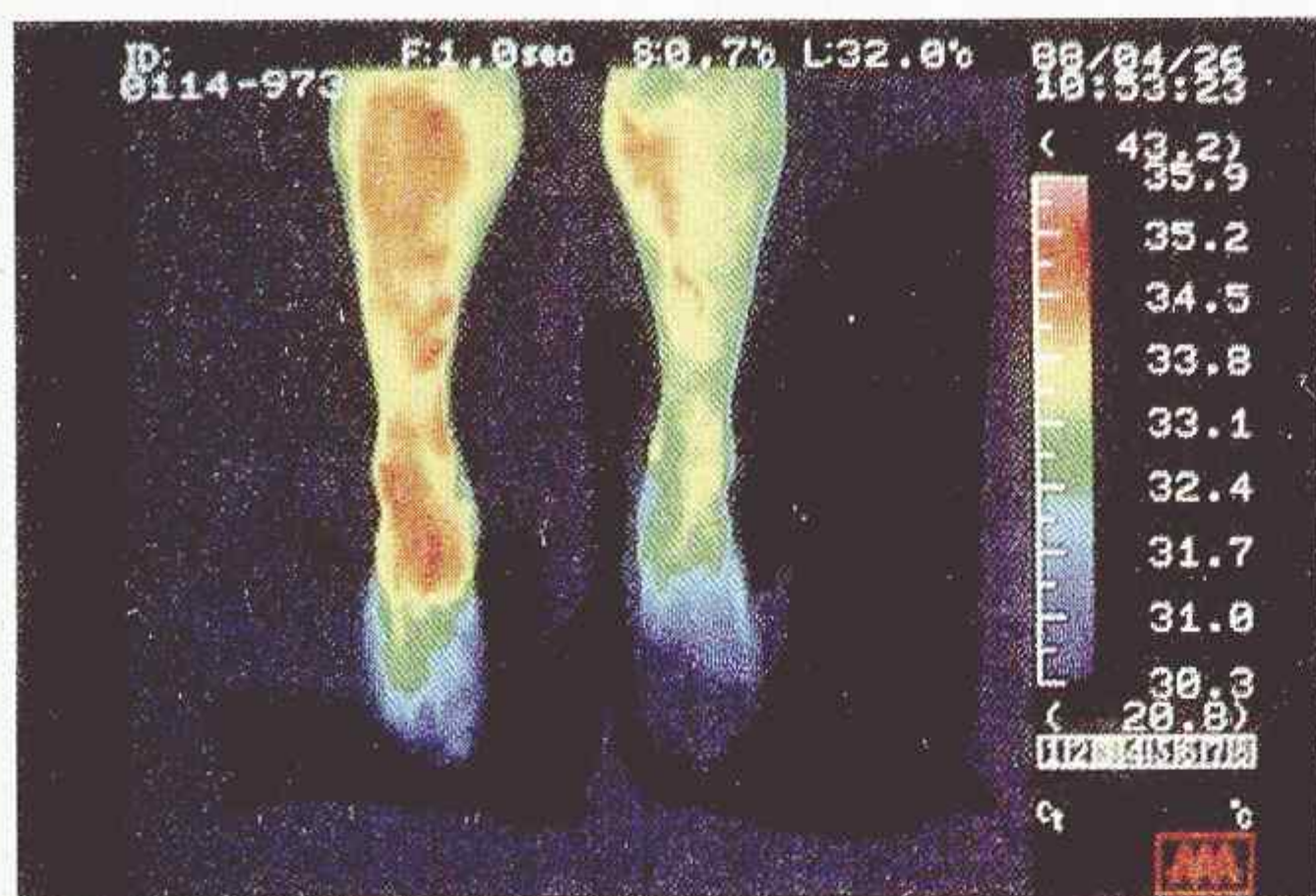
Praca w warunkach złej widzialności. Wykorzystywane jest promieniowanie księżyca, gwiazd, nocnej poświaty nieba i miast, jak i oświetlaczy specjalnych (np. lamp z filtrami podczerwieni). Podstawowe zastosowania koncentrują się na służbach specjalnych i wojsku. (Dużą konkurencję zaczynają stanowić systemy termalne lepiej pracujące w warunkach zakłóceń widzialności oraz maskowania).

W warunkach cywilnych szczególnie cenione są zastosowania we wszelkich pracach wymagających ciemności (np. przemyśle i usługach fotograficznych, badaniach biologicznych, nadzorze ruchu itp.). Potencjalnie korzystne są możliwości stosowania w robotyce.

Nowoczesna aparatura jest budowana zwykle na bazie struktur mikrokanalikowych (wzmacniacze obrazu) lub specjalnie uczulanych na podczerwień matryc oraz mozaik detektorów fotonowych (przetworniki widma oraz kamery typu TV widikonowe oraz IRCCD).



Termograficzna diagnoza stanu technicznego opony



Termograficzne odwzorowanie ukrwienia kończyn przed leczeniem i po leczeniu

Ta grupa sprzętu jest relatywnie tania (1–5 tys. USD).

Porównanie cech spektralnych. Na podstawie niezwykle cennych, nieobrazowych, metod spektrograficznych i spektrometrycznych, wraz z postępem techniki rozwijają się metody wielowidmowej teledetekcji obrazowej. One także wzięły swój początek od zastosowań specjalnych. Zasadnicze pole zastosowań wyznaczają potrzeby badań meteorologicznych (np. satelitarne mapy pogody, potrzeby geologiczne, a zwłaszcza ekologiczne).

W wielowidmowych obrazach podczerwieni zawarte są, np.:

- specyfika widma, np. biomasy o normalnym lub anomalnym stanie chlorofilu, karotenu, wilgoci itp., jak i widma gruntów, skał, złóż oraz powierzchni wód,
- indywidualne cechy widma odbicia (lub absorpcji) atramentów, farb, materiałów tekstylnych i innych.

Dla przypadku pierwszego typowa jest aparatura fotograficzna oraz optoelektroniczna, często wykonywana w małych seriach. Jest ona szczególnie często stosowana w satelitach oraz w samolotach. Nowoczesne systemy wielowidmowej teledetekcji obejmują także badania termograficzne. Szerokokątne przeszukiwanie realizuje zwykle optomechaniczny skanning, przetwornikami promieniowania są zwykle liniowe matryce detektorów o różnych charakterystykach czułości widmowej. Olbrzymi strumień informacji wymaga wyrafinowanych i wciąż rozwijanych technik kompresji, transmisji i gromadzenia danych (z reguły cyfrowych). Ceny aparatury do teledetekcji lotniczej są rzędu kilkudziesięciu do kilkuset tysięcy dolarów.

Systemy diagnostyczne dla przypadku drugiego zazwyczaj są złożone z kamer IRTV oraz specjalnie dobieranych oświetlaczy.

Techniki zobrazowania mono– oraz quasimonochromatycznego. Wykorzystują one możliwość wizualizacji promieniowania z diod i laserów podczerwieni, optycznego kształtowania wiązek i oddziaływania tego promieniowania z materią (analogiczne aplikacje występują w grupie zobrazowań promieniowania dalszego). Jest to bardzo szybko rosnące pole zastosowań aparatury obrazowej, szczególnie wobec gwałtownego rozwoju techniki laserowej wykorzystywanej w licznych zastosowaniach: przemysłowych, badaniach nieniszczących, medycznych, naukowych a także w telekomunikacji światłowodowej oraz w ochronie środowiska. Potrzeby stosowania techniki obrazowej dotyczą zarówno sfery badań laboratoryjnych, dydaktyki, jak i wytwarzania aparatury laserowej oraz jej przyszłej eksploatacji. Ranga tego typu zobrazowań jest szczególnie wysoka wobec zarówno niewidzialności promieniowania, jak i częstego niebezpieczeństwa zwłaszcza dla wzroku ludzkiego.

Zobrazowania uzyskiwane są na specjalnie uczulonych kartach lub w aparaturze optoelektronicznej.

Termografia wysokich temperatur. Wykorzystanie silnej widmowej zależności maksimum wypromieniowywanej energii od temperatury, rokuje szereg możliwości technicznego wykorzystania tanich już kamer typu IRCCDTV (od ok. 1 tys. USD) do zobrazowywania pól termicznych o temperaturach powyżej 900K – a więc w przemysłach metalurgicznych i hutniczych (dotąd stan wykorzystania nieznaczący). Istnieją utrudnienia w badaniach ilościowych, jednakże analiza ilościowa równomierności

rozkładów temperatury wydaje się być atrakcyjną cechą tych tanich kamer podczerwieni. Oko wprawnego mistrza może być zastępowane automatami...

Zobrazowania w zakresie dalszej podczerwieni

Metody szerokopasmowe, termalne – pasywne. Omawiane tu zobrazowania, często nazywane są w skrócie "termalnymi", a w przypadku szczególnego wyeksponowania cech metrologicznych "termograficznymi" (spotykana jest także nazwa "termowizja", firmowo zastrzeżona i dla ogólnych rozważań nie stosowana). Nazewnictwo to nie jest normowane i znanych jest kilkanaście różnych określeń.

Kamery zobrazowania termalnego o wyeksponowanych cechach obserwacyjnych są szczególnie popularne w wojsku, służbach ochrony, policji i w ratownictwie. Obiekty żywe i pracujące są cieplejsze od otoczenia, a przez to szczególnie dobrze widoczne, niezależnie od kolorystyki ich powierzchni zewnętrznych. Zasadniczo, systemy te pracują w warunkach braku widzialności (dymy, ciemności, zamglenia), samonaprowadzanie broni, rozpoznawanie stanu minionego, aktualnego i planowanego. Tę niezwykłą zaletę zobrazowań termalnych widać na ilustracji, na której obrazy cieplne płyty lotniska umożliwiają wyróżnienie miejsca, gdzie samoloty stały przed odlotem, które z nich powróciły z lotu lub grzeją silniki do lotu, a które od dłuższego czasu stoją niewykorzystywane.

W zastosowaniach cywilnych dominuje aparatura do badań ilościowych oraz jakościowych w automatycznej kontroli i sterowaniu, w badaniach okresowych i przedremontowych. Jest ona szeroko stosowana w pracach naukowych, badawczych i wdrożeniowych.

Najpopularniejsze zastosowania obejmują: diagnostykę stanu technicznego instalacji elektrycznych i układów elektronicznych, nadzór pracy systemów cieplnych i ciepłowniczych, wspomaganie nadzoru i automatyki procesów technologicznych, wykrywanie podpowierzchniowych niejednorodności materiałów, wad izolacji i połączeń, wykrywanie skażeń cieplnych i chemicznych, ocenę stanu zawilgocenia, ocenę stanu ukrwienia itp.

Aparatura termalna jest zazwyczaj bardzo kosztowna. Wynika to ze skali produkcji, ograniczeń technologicznych oraz ze złożoności budowy (od 10 tys. USD do 100 tys. USD).

Na rynku występuje wielu producentów, liczbę kamer szacuje się na ponad 70 000 szt. Przełom cenowy i ilościowy zapowiada pojawienie się kamer IRCCD, w tym zwłaszcza z matrycami detektorów termicznych (niewymagających kłopotliwego i drogiego chłodzenia).

Metody szerokopasmowe, termalne – aktywne. Są one najszerzej stosowane w badaniach nieniszczących, w tym zwłaszcza materiałów niemetalicznych (kompozytów i tworzyw sztucznych) oraz w badaniach procesów przenoszenia ciepła i w mechanice strug.

Dominują dwa typy wymuszeń przepływu ciepła: zewnętrzny (żarówki, lasery, dmuchawy powietrza, pola elektromagnetyczne) oraz wewnętrzny (objętość elementu jest przestrzennym źródłem ciepła, jako wyniku histerezy lub efektu termoelastycznego, towarzyszącego drganiom lub jako wynik przepływu prądu). Defekty objawiają się określonymi zaburze-

niami obrazów termicznych (w czasie i na powierzchni, w amplitudzie i w fazie). Do nowości należą metody badań synchronicznych (lockin-fototermiczne, lockin-termograficzne, lockin-wibrotermograficzne). Pomimo, że metody te nie są standaryzowane, są już stosowane rutynowo w kontroli jakości produkcji, zwłaszcza elementów kompozytowych oraz w badaniach aerodynamicznych.

Stanowiska pomiarowe składają się na ogół z typowych kamer termograficznych lub skanerów liniowych oraz źródeł wymuszeń wraz z układami mikroprocesorowej synchronizacji i przetwarzania informacji obrazowej (szczególna rola filtracji szumów).

W grupie innych cywilnych zastosowań szczególnie cenne są lotnicze i satelitarne zobrazowania wielospektralne, obejmujące także zazwyczaj zakres widzialny (a nawet nadfioletu). Każdy z odpowiednio dobranych subzakresów wnosi specyficzne informacje, których kojarzenie wzajemne wraz z bazą wzorców umożliwia wykonywanie dziesiątków rodzajów badań zasobów Ziemi, warunków ekologicznych, przewidywać pogodę, prognozować i oceniać plony, a także badać wszechświat.

Obrazy tego typu realizowane są w całkowicie umownych kolorach, co zresztą jest cechą wspólną technik obrazowych poza zakresem widzialnym.



W wielowidmowych obrazach podczerwieni są między innymi zawarte informacje o złożach geologicznych

Technika zobrazowań wielospektralnych rokuje także sporo nadziei dla klasycznej termografii. Dotąd, szczególnym utrudnieniem większości badań ilościowych jest konieczność uwzględniania emisyjności badanych powierzchni, promieniowania odbijanego oraz wpływu kanału atmosferycznego.

Do ważnych dla bezpieczeństwa pracy, ciągłości procesów produkcji a także ekologii należy zaliczyć systemy wizualizacji wybranych typów gazów w powietrzu. Tego typu aparatura wykonywana jest jako pasywna lub aktywna (np. z wykorzystaniem przestrajanych laserów).

Metoda termografii w podczerwieni

Niezależnie od naszej woli, zarówno my sami, jak i całe nasze otoczenie, promieniuje i absorbuje energię przenoszoną poprzez fotony. Intensywność tej emisji bardzo silnie wzrasta ze wzrostem temperatury. I tak np. włączając kuchenkę elektryczną najpierw pocujemy ciepło, a przy dostatecznie dużym nagrzaniu zauważymy początkowo czerwone, a później coraz jaskrawsze "świecenie" płyty grzewczej. Dzięki aparaturze termograficznej możemy w umownej formie dostrzec "świecenie" całego naszego otoczenia (z wnętrzem zamrażalnika włącznie...).

Odbieramy i przetwarzamy w umowny obraz niewidzialne, lecz wszechobecne promieniowanie podczerwone wysyłane z powierzchni (!) obiektu "obserwacji".

W danej temperaturze (np. innej od otoczenia) liczba emitowanych z powierzchni ciała fotonów jest zależna od stopnia gładkości powierzchni (a nie od jej koloru). Im powierzchnia będzie gładziej tym mniej fotonów "spod powierzchni" będzie emitowanych. Okazuje się, że w przypadku termografii w podczerwieni dwie różne powierzchnie, pomimo tej samej temperatury, mogą "świecić" z różną intensywnością. Gładziej powierzchnia będzie zachowywać się bardziej jako zwierciadło (częściowo odbijając padające na nią promieniowanie źródła znajdującego się w otoczeniu, np. kaloryfera, żarówki, słońca). Dodatkowo wzajemne relacje promieniowania samoistnego – temperaturowego – i promieniowania odbijanego zależą od kąta pochylenia (lub krzywizny) obserwowanej termograficznie powierzchni...

Odbierane promieniowanie zależy od temperatury powierzchni obiektu badań, od rodzaju oraz stanu tej powierzchni, jej położenia względem kamery i jej otoczenia.

W zależności od odległości oraz stanu otaczającego nas powietrza widzimy różną liczbę szczegółów i odnotowujemy zmiany jaskrawości obrazu. Czasem pomagamy sobie okularami przeciwmgielnymi, a czasem lornetką (zawężającą co prawda całkowite pole obserwacji). Zupełnie podobnie reaguje kamera termograficzna.

Na ilość i jakość informacji w zobrazowaniach termalnych ma wpływ stan atmosfery, a zwłaszcza właściwie dobrane cechy i parametry kamery termograficznej.

Gdy otrzymany już obraz termalny pragniemy powiązać z temperaturą musimy po kolei uwzględnić wszystkie elementy ww systemu tj.

- warunki detekcji i przetworzenia niewidzialnego strumienia fotonów w strumień fotonów wykrywany wzrokiem;
- warunki przenoszenia badanych sygnałów przez atmosferę,
- cechy promienne badanej powierzchni obiektu, uwzględniając także wpływ otoczenia.

W pracach tych stosować można często bardzo liczne uproszczenia, wykorzystywać dane eksperymentalne, wzorce wewnętrzne i zewnętrzne (jak np. pomiary stykowe, czy odpowiednie promienniki). Obecnie prace przeliczeniowe zazwyczaj realizują układy mikroprocesorowe.

Dla potrzeb analizy ilościowej obrazu termalnego niezbędne jest wykonanie odpowiednich przeliczeń, a dla jakości wyniku istotne znaczenie ma nadal specyficzna wiedza operatora.

Choć pole potencjalnych oraz znanych zastosowań obejmuje setki przykładów, a obrazy termograficzne są niemal powszechnie znane, tylko w energetyce i budownictwie metody termograficzne uzyskały unormowania. Podejmowane są próby certyfikacji operatorów. Wynika to z faktu, że kamery termalne są coraz tańsze, coraz łatwiejsze w obsłudze (a zatem coraz popularniejsze). Jednakże łatwość uzyskania efektownego termogramu jest często błędnie utożsamiana z łatwością jego interpretacji. Pomyłki operatorów kamer termalnych mogą być czasem bardzo kosztowne.

Tendencje rozwojowe aparatury termograficznej

Niezwykle silna stymulacja potrzebami militarnymi oraz podboju kosmosu spowodowała opracowanie i rozpowszechnianie nowych, bardzo ważnych dla techniki termograficznej, technologii i konstrukcji.

W szczególności należy wymienić pojawienie się matryc niechłodzonych detektorów termicznych, doskonalenie matryc detektorów fotonowych wraz z wymaganymi do ich pracy miniaturowymi, zamkniętymi (maszy-

nowymi) układami kriogenicznego chłodzenia (77K), wysoce sprawnych chłodziarek termoelektrycznych (195K), opanowanie technologii "światłowodów" podczerwieni oraz niezwykle szerokie wykorzystywanie mikroelektroniki, a w tym najnowszej techniki komputerowej i techniki realizacji wideokopii z ekranów PC.

Najistotniejsze zmiany jakościowe i największe perspektywy nowej jakości badań, w tym także dla potrzeb technicznych, należy upatrywać w pojawieniu się i ciągłym doskonaleniu kamer bezskaninowych, a także w cyfrowym wspomaganiu pracy kamery oraz pracy interpretera. Współczesna diagnostyka, nie tylko termalna, używa coraz powszechniej informacji obrazowych, a problem ich gromadzenia oraz szybkiego dostępu wymaga pilnego rozwiązania. Magnetyczne i optyczne systemy zapisu obrazów poddanych wysokiej kompresji to silnie rozwijany obecnie kierunek prac.

Kamery z matrycami detektorów IRFPA (IR "focal plane array")

Od około 6 lat jesteśmy świadkami wprowadzania na rynek cywilny kamer termalnych z detektorami fotonowymi (warunkującymi m.in. bardzo wysokie szybkości i czułości), w których wyeliminowano układy optomechanicznego skanowania. Matryce od 128x128 do 1024x1024 elementów detekcyjnych (w chłodziarkach obiegu zamkniętego lub otwartych) są komutowane cyfrowo i cyfrowo są przetwarzane sygnały z poszczególnych detektorów.

Najnowsze prace donoszą o tak dużej doskonałości metod korekcji różnic w czułościach poszczególnych detektorów podczerwieni, że oprócz typowych już zastosowań do badań jakościowych lub obserwacji, kamery z IR FPA spełniać będą typowe wymagania systemów pomiarowych. Należy też wskazać, że cały czas trwają poszukiwania coraz to nowych materiałów i technologii detektorów podczerwieni. Dąży się do połączenia bardzo niskich progów wykrywalności promieniowania z minimalnym rozrzutem tych parametrów oraz niską ceną produkcji.

Ceny kamer IRFPA są już mocno konkurencyjne zwłaszcza, że uzyskiwane są szybkości analizy do 1000 obrazów/s, niezwykle duże rozdzielczości przestrzenne oraz rozdzielczości temperatury dochodzące do 15mK (!).

Jednakże zasadniczych zmian ilościowych i wzrostu popularności technik "widzenia termalnego" należy prawdopodobnie oczekiwać od kamer najtańszych, w których stosowane są detektory termiczne (matryce mikrobolometryczne lub piroelektryczne pracujące w temperaturach otoczenia). Jest wysoce prawdopodobne, że kamery takie, w cenie zaledwie kilku tysięcy dolarów, przejmą dużą część zadań wykonywanych obecnie przez wzmacniacze obrazu i inne systemy noktowizyjne (wykorzystujące promieniowanie odbijane).

Technika obrazowa, zwłaszcza optoelektroniczna jest, jak wiadomo, wysoce przydatnym narzędziem diagnostyki ze względu na: olbrzymią pojemność i uniwersalność informacyjną oraz łatwość sprzęgania z techniką elektroniczną, a za jej pośrednictwem z innymi technikami.

Technikę optoelektronicznej zdalnej detekcji i zobrazowań pól termalnych cechują dwa różne typy zadań (i wymagań na sprzęt):

Zadania obserwacyjne takie jak np.:

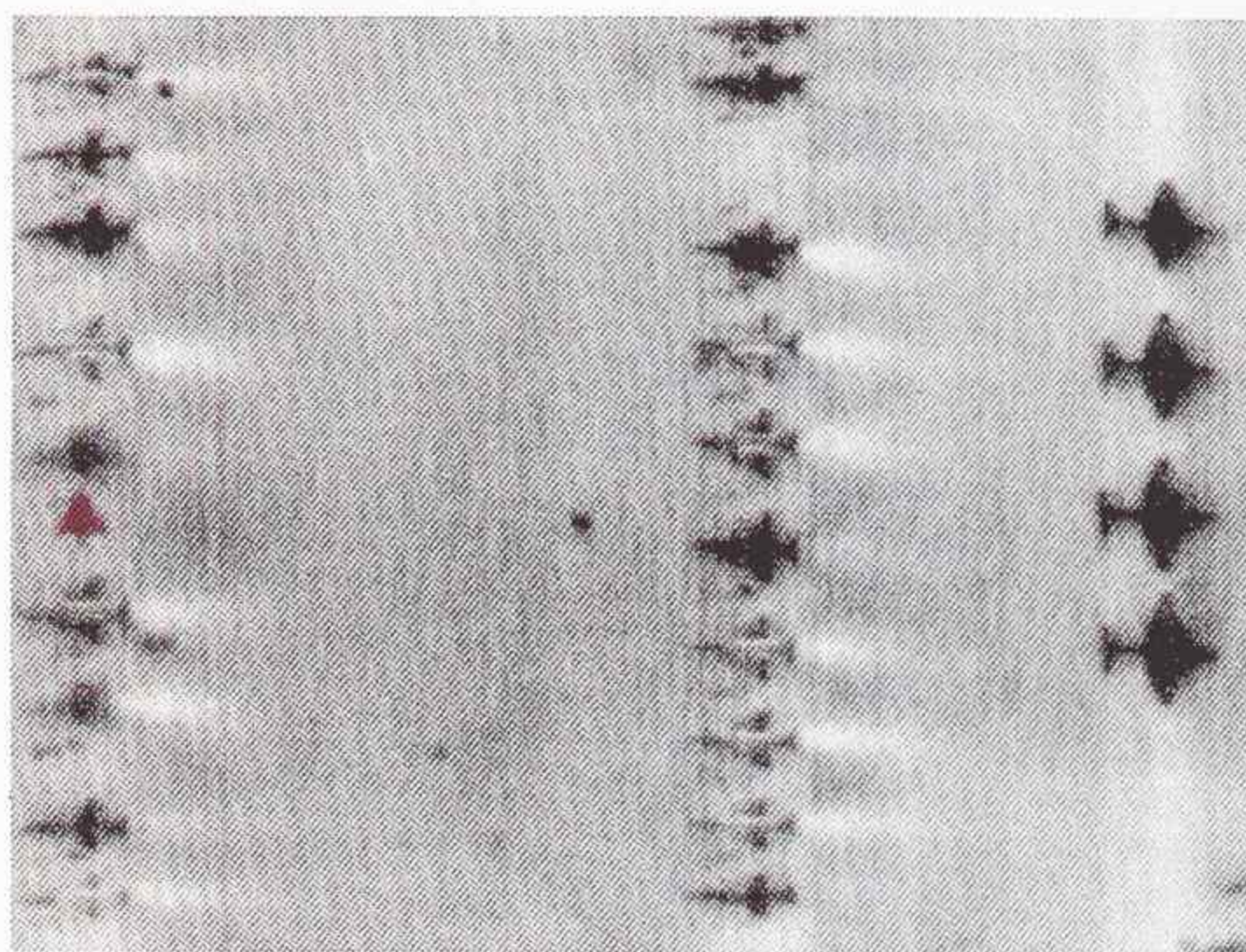
- wykrywanie istnienia obiektu,
- wykrywanie ruchu, nadzorowanie ruchu,
- rozpoznawanie obiektów, nawigacja.

Zadania kontroli i pomiarów z docelową oceną m.in.:

- temperatury (powierzchniowej i pośrednio podpowierzchniowej),
- stanu izolacji (termicznej oraz szczelności),
- oporów (tarcia oraz przepływu: prądu elektrycznego, cieczy),
- zawilgocenia (wady, sterowanie procesami),
- obciążeń i naprężeń w badaniach materiałów i instalacji,
- niejednorodności struktur podpowierzchniowych,
- przestrzenne rozkłady pól elektrycznych oraz magnetycznych,
- poszukiwań i inwentaryzacji ukrytych obiektów oraz instalacji.

Skuteczność w realizacji zadań z grupy tzw. obserwacyjnych wyznaczają:

- praktyczna niemożność idealnego maskowania,
- świetna praca w nocy (lepsza niż w dzień),
- duże zasięgi wykrywania (wysoka zdolność rozdzielcza, kilkukrotnie wyższe zasięgi w warunkach zamgleń i drobnych opadów, dobra praca w dymach specjalnych oraz towarzyszących pożarom),
- małe gabaryty oraz powszechna możliwość rejestracji wideo.



Obrazy cieplne płyty lotniska umożliwiają wyróżnienie miejsc, gdzie samoloty stały przed odlotem

Korzyści z wykonania zadań grupy "kontrolno-pomiarowej" zależą w zasadniczym stopniu od wiedzy, doświadczenia i umiejętności diagnozowania lub prognozowania w oparciu o analizę pola temperatur. Zdecydowana większość anomalii objawia się wcześniej – termicznie – niż wystąpią inne, poważniejsze jej symptomy, czy też skutki. Z drugiej strony temperatura, jej właściwy poziom czy rozkład, jest bardzo często jednym z istotniejszych warunków poprawnej pracy czy przebiegu procesu.

W warunkach polskich dostęp do sprzętu nowszej generacji jest obecnie utrudniony tylko z przyczyn finansowych. Liczba producentów markowej aparatury termograficznej na świecie jest znaczna.

Ze względu na bariery technologiczne oraz zachodnie utrudnienia importowe (zwłaszcza w zakresie wysokiej jakości detektorów promieniowania) krajowa oferta była dotąd niezbyt atrakcyjna. Obecnie oferowane są kamery termograficzne z pojedynczym detektorem fotonowym, chłodzonym ciekłym azotem lub termoelektrycznie (pierwsze modele użytkowe). Kamery telewizyjne, kamery z matrycami detektorów i skanowaniem, czy też kamery z IRFPA dla potrzeb cywilnych nie są w kraju produkowane.

Na przestrzeni ok. 25 lat do kraju sprowadzono ponad 70 kamer termograficznych (głównie w latach siedemdziesiątych). Godny odnotowania jest fakt, że dzięki rozwojowi techniki cyfrowej niemal wszystkie te kamery można radykalnie usprawnić pod względem zarówno wygody eksploatacji, jak i możliwości pomiarowych.

W szczególności można poprawić takie niedogodności (których z reguły nie mają współcześnie oferowane systemy termograficzne), jak np.:

- uwzględniać wpływ dryftów poprzez duże ułatwienie kalibracji kamer wg eksperymentu,
- możliwość wielowariantowej analizy tych samych danych,
- wielokrotne skrócenie czasu opracowania termogramów,
- możliwość natychmiastowego niemal magazynowania, jak również odzyskiwania z banku danych,
- możliwość wykorzystywania wszelkich urządzeń z grupy oprzyrządowania komputerów (drukarki kolorowe, systemy transmisji danych po liniach telefonicznych, itp.).

Wraz z poprawą stanu naszej gospodarki i obniżką cen aparatury wzrastać będzie liczba kamer do badań jakościowych oraz ilościowych, wraz z otwarciem rynków światowych wzrastają problemy jakości, nowoczesności i niskiej ceny wytwarzania dóbr, wzrastają koszty energii oraz wymagania ochrony środowiska. Jednocześnie nowoczesną aparaturą coraz łatwiej uzyskuje się bardzo efektowne i zawierające mnóstwo danych termogramy. Ta łatwość może być jednak źródłem wielu rozczarowań a nawet bardzo poważnych strat o ile operator nie nabędzie odpowiedniej wiedzy i praktyki – specyficznej dla danych zastosowań. Nasuwa się tu doskonała analogia do nowoczesnych medycznych technik diagnostycznych. □

Laser reprezentuje jedno z najbardziej godnych uwagi osiągnięć naukowych i technicznych dwudziestego wieku. Od chwili doniesienia o uruchomieniu przez Theodora H. Maimana pierwszego lasera w dniu 16 maja 1960 roku, nastąpił gwałtowny rozwój techniki i technologii laserowej.

Obecnie, lasery używa się w najbardziej odmiennych i różnych dziedzinach, takich jak: biologii i medycynie; łączności i komunikacji; naziemnych, powietrznych i kosmicznych systemach radarowych; zdalnym monitorowaniu środowiska naturalnego (powietrza, fauny i flory); obróbce materiałów i przemyśle; różnego typu pomiarach i czujnikach, a także w badaniach naukowych.

Lasery - zastosowania

Zdzisław Jankiewicz, Jan Marczak

Laser jest bardzo specyficznym źródłem światła, ogromnie różnym od żarzących się żarówek, światła fluorescencyjnego itp. W przeciwieństwie do tych źródeł, promieniowanie lasera charakteryzuje się wysokim stopniem uporządkowania pola świetlnego. To pojęcie wyraża się ilościowo za pomocą tzw. **stopnia koherencji** (spójności) światła, określającego zdolność jego do interferencji nawet dla różnicy dróg optycznych sięgających tysięcy metrów. Tak więc laser jest źródłem spójnych fal optycznych w przeciwieństwie do innych źródeł światła, które generują tylko, tzw. "szum optyczny".

Zróżnicowanie promieniowania wymuszonego – lasery

U podstaw działania generatora fal świetlnych, lasera leży odkryte w 1917 r. przez A. Einsteina zjawisko emisji wymuszonej. Między emisją spontaniczną (samorzną), a wymuszoną istnieją duże różnice. Emisja spontaniczna polega na powstaniu pojedynczego fotonu, natomiast efektem emisji wymuszonej jest zawsze drugi

o bardzo wysokim stopniu monochromatyczności.

Istotną cechą różniącą laser od innych generatorów fal elektromagnetycznych jest mechanizm wzmocnienia. Wzmocnienie w laserach zachodzi na drodze wymuszonej emisji promieniowania, spowodowanej przejściem cząstki (atomu, jonu, molekuly) z wyższego stanu energetycznego do niższego. Przejścia cząstek z jednego poziomu energetycznego na drugi można powodować oddziałując polem elektromagnetycznym. Przy dostatecznie długim oddziaływaniu dochodzi do wymuszonej emisji fotonów. Aby ośrodek uczynić wzmacniającym trzeba zgromadzić więcej cząstek na wyższym poziomie energetycznym niż na poziomie niższym. Taki stan nazywa się **inwersją obsadzeń**. Proces prowadzący do uzyskania inwersji obsadzeń nazywa się **pompowaniem**. Pominiemy tutaj zależności, jakie muszą być spełnione aby doszło do generacji fal optycznych o bardzo wysokim stopniu monochromatyczności. Nie zostanie również omówiony schemat funkcjo-

wiązki w czasie i między dowolnymi punktami jej przekroju poprzecznego, stwarza to niezwykłą zdolność wiązek laserowych do tworzenia obrazów interferencyjnych:

– bardzo mały kąt rozbieżności wiązki laserowej rzędu mrad, ponieważ wiązka emitowana jest w ściśle określonym przez oś optyczną rezonatora kierunku;

– możliwość uzyskiwania ogromnych gęstości mocy w trakcie ogniskowania wiązki za pomocą układów optycznych (obecnie uzyskuje się gęstości rzędu 10^{18} W/cm²). Z tak dużą gęstością mocy związane jest występowanie dużego natężenia pola elektrycznego fali elektromagnetycznej, któremu może towarzyszyć jonizacja ośrodka, czy zmiana własności optycznych;

- możliwość generacji różnych długości fal promieniowania emitowanego przez różne lasery może wynosić od około 10 nm do ponad 1 mm;

– możliwość uzyskiwania wiązek spolaryzowanych liniowo, katowo lub eliptycznie;

– możliwość pracy ciągłej lub impulsowej rzędu 10^{-15} s.

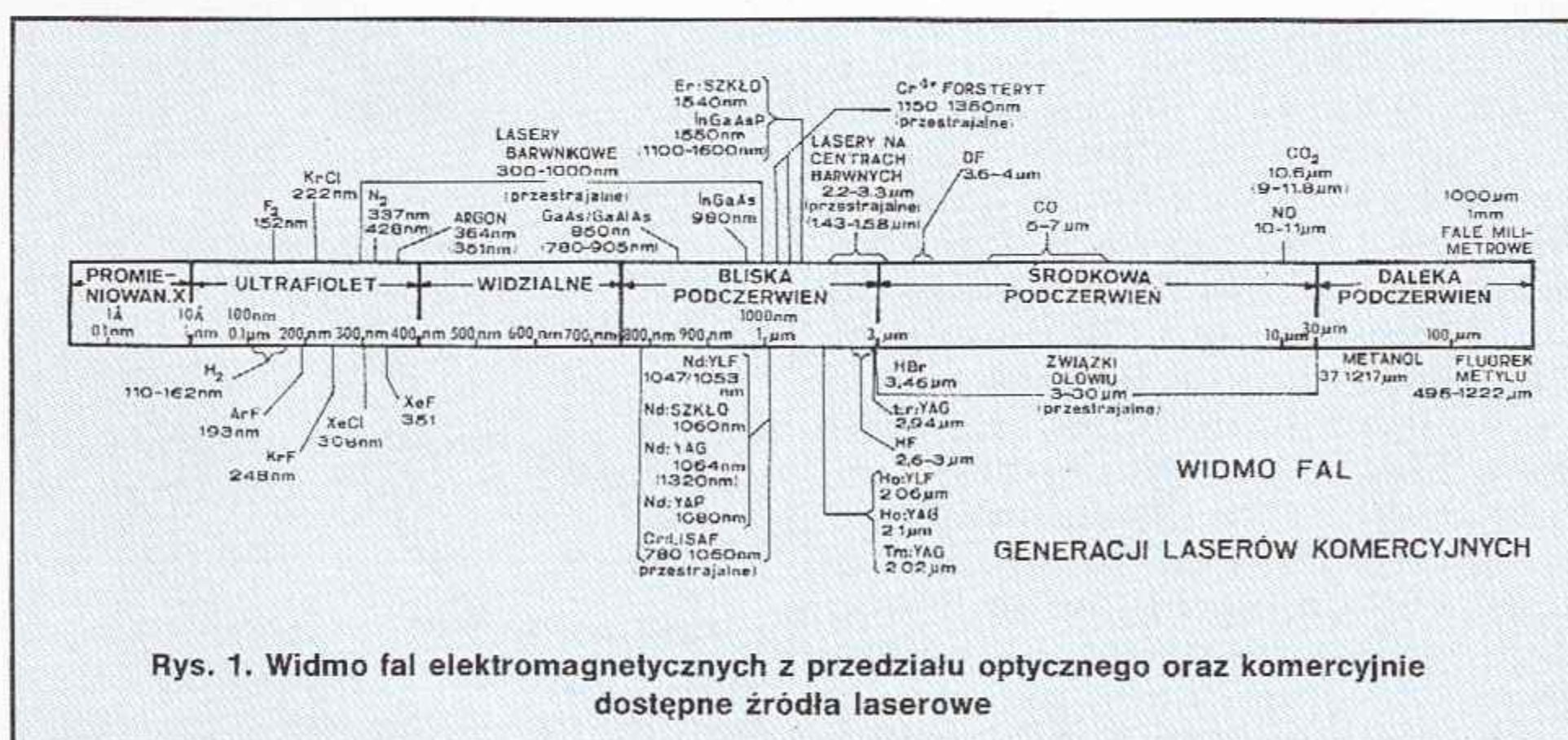
Na rysunku 1, przedstawiono niektóre (wybrane), komercyjnie dostępne lasery, usytuowane na skali widma fal optycznych.

Zastosowania laserów są bardzo różnorodne. Najważniejsze z nich zgrupować można w trzech zasadniczych kierunkach: medycyna, metrologia i technologia.

Zastosowanie laserów w medycynie

W latach 60. przeprowadzono po raz pierwszy udane próby wykorzystania lasera rubinowego do koagulacji siatkówki oka. Dziś znane są setki różnych typów laserów wykorzystujących różne materiały aktywne, z których każdy w większym lub mniejszym stopniu może być przydatny w diagnostyce lub terapii medycznej.

Lasery w medycynie mogą być wykorzystywane do diagnostyki stanu organizmu (lasery diagnostyczne), lub terapii schorzeń (lasery terapeutyczne). Te ostatnie z kolei można podzielić na stymulacyjne i chirurgiczne. Lasery diagnostyczne i stymulacyjne to lasery małej mocy. Zadaniem laserów stosowanych w chirurgii jest destrukcja tkanek, a odbywa się to na drodze termicznej, termiczno-mechanicznej lub mechanicznej. Lasery te generują promieniowanie o znacznie większych mocach i stąd często mówi się o nich jako o energetycznych. Charakter oddziaływania promieniowania laserowego na tkankę zależy od parametrów pro-



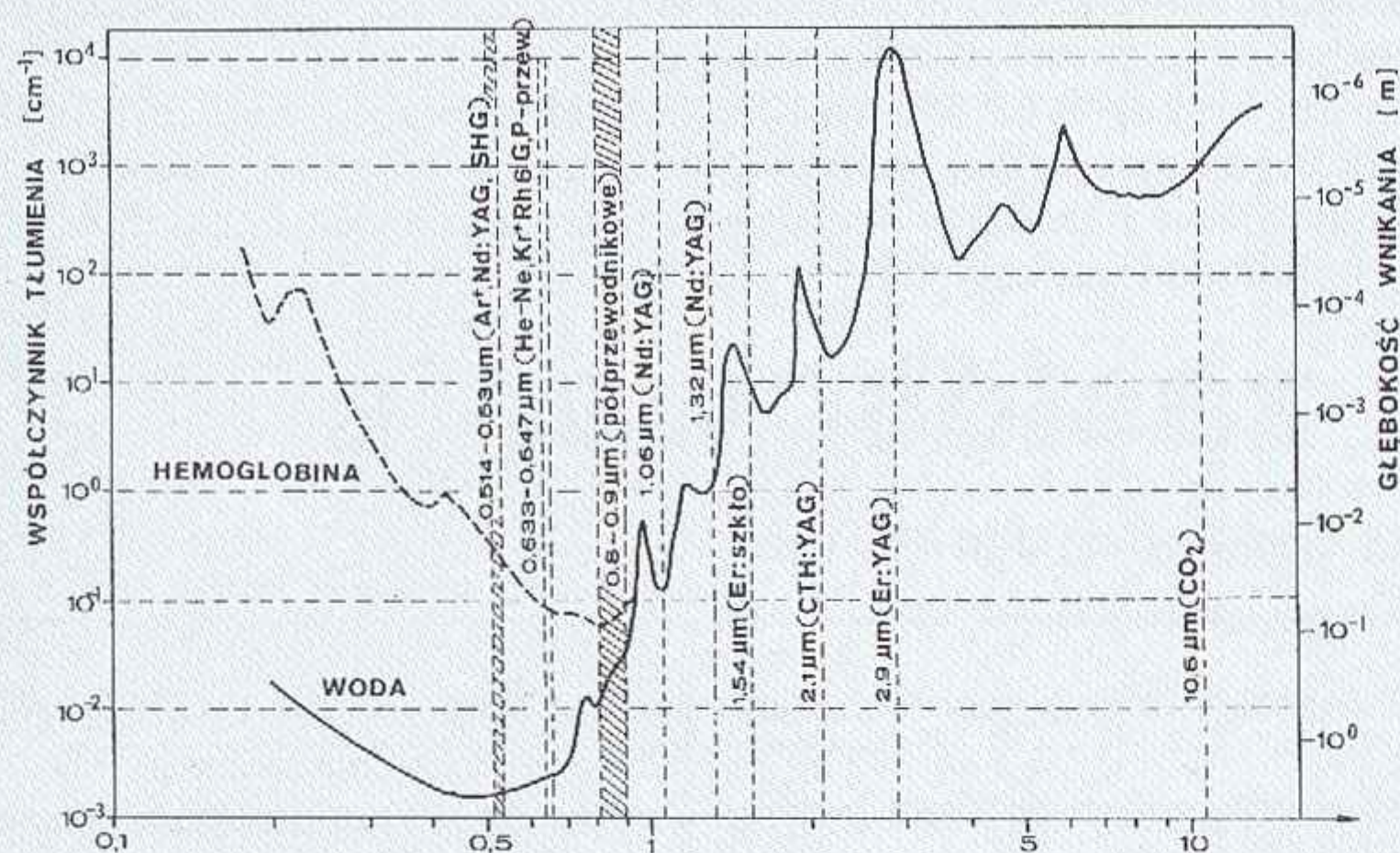
Rys. 1. Widmo fal elektromagnetycznych z przedziału optycznego oraz komercyjnie dostępne źródła laserowe

foton (oprócz fotonu wymuszającego foton wymuszony). Te dwa z kolei fotony mogą wymusić emisję dwóch kolejnych itd. Emisja spontaniczna przebiega niezależnie w różnych atomach, emisja wymuszona jest uwarunkowana przez fotony już istniejące w ośrodku. Foton wymuszony porusza się w tym samym kierunku co foton wymuszający i w zgodnej z nim fazie i polaryzacji. Wiązka powstająca w wyniku kolejnych aktów emisji wymuszonej jest regularnym spójnym ciągiem falowym. Ponieważ emisja wymuszona jest zjawiskiem rezonansowym, powstająca wiązka jest jednobarwna

nalny lasera. Przedstawienie bowiem tych zagadnień przekracza zarówno zakresem, jak i stopniem trudności założenia tego artykułu. Niezwykle istotną sprawą z punktu widzenia zastosowań laserów jest przedstawienie ich właściwości, różniących je od innych źródeł światła, są to:

– bardzo mała szerokość linii emisyjnej (najmniejsza wśród znanych źródeł światła), tzw. szerokość spektralna mierzona w skali długości fali może osiągnąć 10^{-7} nm;

– wysoka spójność przestrzenna i czasowa, tzn., że występuje stały związek fazowy dla



Rys. 2. Pochłanianie promieniowania laserowego przez wodę i hemoglobinę w funkcji długości fali

mieniowania i własności tkanki. Występują tu zjawiska odbicia, rozpraszania i pochłaniania promieniowania przez tkankę. Penetracja światła laserowego zależy od długości fali, i zdeterminowana jest w zasadzie przez pochłanianie promieniowania przez wodę i hemoglobinę (rys. 2).

Silna zależność współczynnika pochłaniania od długości fali powoduje, że w medycynie znajdują zastosowanie lasery generujące zarówno w ultrafiolecie jak i w zakresie widzialnym oraz dalekiej podczerwieni. W zależności od mocy promieniowania i czasu naświetlania tkanki mogą wystąpić różne efekty. Rozróżnia się następujące efekty oddziaływania: fotochemiczne, cieplne (koagulacja, odparowanie) i elektromechaniczne.

Na rys. 3 podano ogólną charakterystykę i najważniejsze parametry laserów stosowanych w medycynie, a także wartości czasu generacji i gęstości mocy, jakie przy ich pomocy można wytworzyć oraz efekty, które wystąpią przy oddziaływaniu ich promieniowania na tkanki. Wśród medycznych laserów gazowych wymienić należy trzy typy: atomowy laser He-Ne, jonowe (Ar⁺ i Kr⁺) oraz molekularny CO₂. Laser He-Ne jest laserem ciągłego działania o stosunkowo niewielkiej mocy. Może generować promieniowanie zarówno w zakresie widzialnym jak i podczerwieni. W medycynie wykorzystywane jest głównie promieniowanie o $\lambda = 632,8$ nm i mocy (0,5 – 5) mW w biostymulacji oraz jako źródło światła podświetlającego pole operacji. Lasery jonowe (argonowe i kryptonowe) niepodzielnie jak dotąd są wykorzystywane w oftalmologii do koagulacji siatkówki. Laser argonowy często jest stosowany także w dermatologii.

Wspomniane powyżej lasery (He-Ne i jonowe) charakteryzują się doskonałą jakością wiązki. Ich promieniowanie udaje się przesyłać światłowodami o niewielkiej średnicy rdzenia (50 μm). Mają one jednak stosunkowo duże wymiary, oraz złożoną budowę i zasilanie (szczególnie laser jonowy). Należy przypuszczać, że w przyszłości lasery te zostaną zastąpione przez lasery półprzewodnikowe.

Trzeci z laserów gazowych – molekularny laser CO₂, jest typowym laserem energetycznym. Laser ten jako pierwszy został zastosowany w chirurgii i w dalszym ciągu jest na tym polu szeroko wykorzystywany. Łatwo w nim uzyskać potrzebne do różnych zabiegów moce i energie. Jego wadą jest zbyt duża długość generowanej fali, 10,6 μm. Do przesyłania mocy tego lasera używane są niewygodne i ciężkie pantoграфy. Poszukiwanie innych konstrukcji falowodów, w tym światłowodów na ten zakres długości fal nie zostało jak na razie uwieńczone sukcesem.

Mówiąc o medycznych laserach gazowych należy wspomnieć o dość kontrowersyjnych laserach ekscymerowych, ich możliwościach i ograniczeniach. Na rysunku 3 przedstawiono je aż w trzech wersjach ArF ($\lambda = 195$ nm) i KrF ($\lambda = 248$ nm) XeCl ($\lambda = 308$ nm). Są to lasery generujące stosunkowo krótkie (nanosekundowe) impulsy w zakresie ultrafioletu. Ich promieniowanie jest silnie pochłaniane przez wodę. Mają więc typowo powierzchniowe oddziaływanie i doskonale nadają się do cięcia tkanek. Z racji dość precyzyjnego dawkowania energii i stosunkowo wysokiej częstości powtarzania impulsów, prowadzono przy ich pomocy badania możliwości korekcji krzywizny rogówki oka. Te same efekty można obecnie osiągnąć stosując lasery długofalowe (Ho:YAG lub Er:YAG). Wydaje się, że to znacznie ogranicza stosowanie laserów ekscymerowych, gdyż mają one zasadnicze wady szczególnie ważne w przypadku zastosowań medycznych:

- złożoną budowę (przepływ gazu) i zasilanie;
- toksyczne składniki ośrodka czynnego (chlor i fluor),

- energia kwantu tego promieniowania jest duża (ultrafiolet) i jego oddziaływanie na tkanki związane jest z ryzykiem, którego zakres – o ile wiadomo, nie jest jeszcze w pełni poznany.

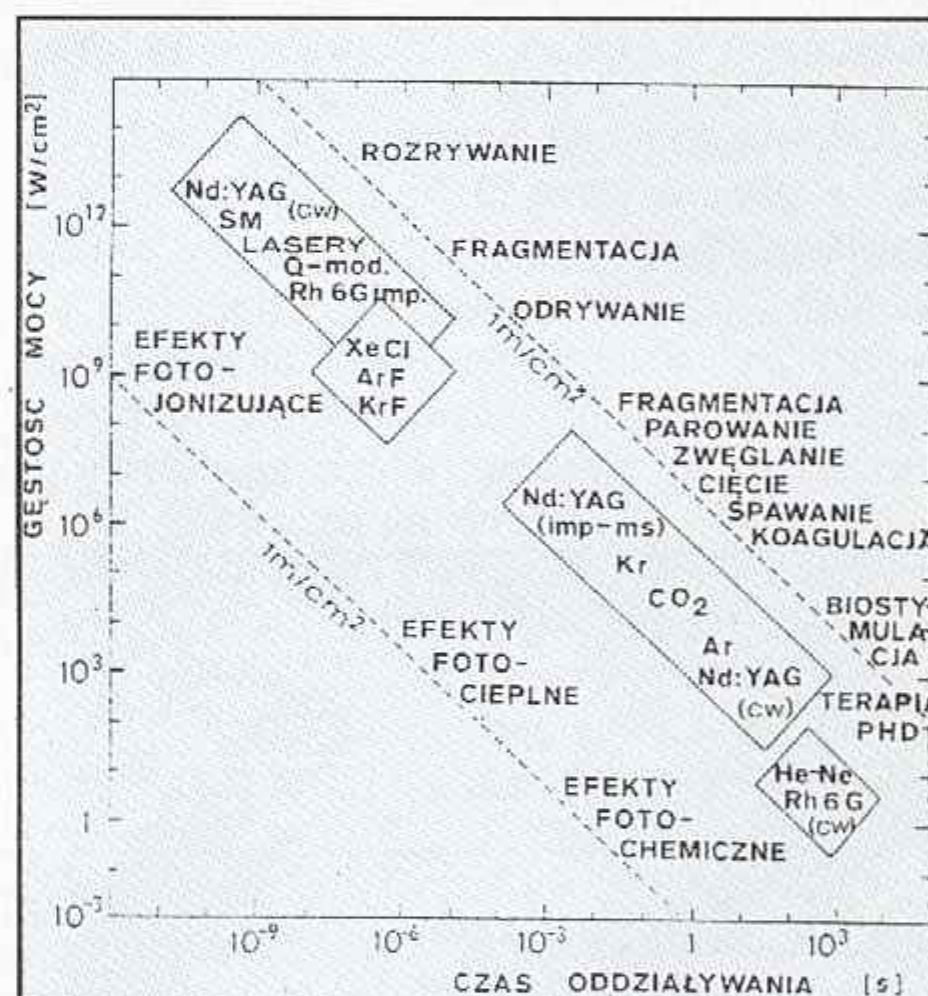
Spośród laserów ciekłych jedynie grupa laserów barwnikowych ma dostatecznie dobre parametry, odpowiadające zastosowaniom medycznym. Są one wykorzystywane w oftalmologii i terapii hematomporfyrinowej. Jak się wydaje lasery barwnikowe ze względu na ich

wady będą wyeliminowane przez lasery stałe: krystaliczne i półprzewodnikowe.

Ostatnią grupę – lasery stałe – można podzielić na dwie podgrupy: lasery krystaliczne domieszkowane jonami metali lub jonami pierwiastków ziem rzadkich i lasery półprzewodnikowe. W zakresie laserów półprzewodnikowych dokonał się w ostatnim czasie kolosalny postęp. Generują one coraz większe moce tak przy pobudzaniu ciągłym jak i impulsowym i coraz krótsze fale. Handlowo dostępne są lasery o $\lambda = 635$ nm, zaś w warunkach laboratoryjnych działają już lasery generujące promieniowanie o barwie zielonej i niebieskiej. Lasery te mają szereg innych zalet: małe wymiary i łatwe pobudzanie realizowane poprzez przepływ prądu przez złącze. Nic więc dziwnego, że wypierają one z zastosowań medycznych inne lasery: He-Ne, barwnikowe, a wkrótce być może także jonowe.

Duże szanse w zastosowaniach medycznych mają lasery krystaliczne ze względu na możliwość pracy ciągłej i generacji krótkich nano- i pikosekundowych impulsów. Ponadto ponieważ generują w zakresie bliskiej podczerwieni łatwo można je transmitować światłowodami kwarcowymi.

Promieniowanie – będących w powszechnym użyciu laserów Nd:YAG głęboko penetruje



Rys. 3. Zakresy występowania różnych oddziaływań promieniowania laserowego na tkankę

w tkanki (rys. 2). Efekt ten można traktować jako zaletę (koagulacja naczyń krwionośnych) jak i wadę (obszerna martwica tkanek przylegająca do miejsca cięcia). Stąd zainteresowanie laserami krystalicznymi Ho:YAG ($\lambda = 2,1$ μm) i Er:YAG ($\lambda = 2,9$ μm) których promieniowanie jest bardzo silnie pochłaniane przez wodę. Promieniowanie to oddziałuje powierzchniowo na tkanki i obszar koagulacji jest znikomy. Oczywiście nie ma wtedy mowy o koagulacji naczyń krwionośnych i bezkrwawym prowadzeniu zabiegu, co uznawane było za jedną z zalet stosowania lasera: Nd:YAG w chirurgii tkanek silnie ukrwionych.

Na koniec warto jeszcze wspomnieć o dwóch nowych laserach, które jeszcze nie są wymieniane przy okazji medycznych zastosowań la-

serów. Można jednak zaryzykować twierdzenie, że lasery te na pewno zostaną zauważone w terapii, bądź w diagnostyce medycznej, w której trzeba będzie precyzyjnie dobierać długość fali promieniowania. Lasery te generują bowiem w bardzo szerokim zakresie długości fal i mogą być przestrajane:

- laser tytanowy ($\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) w paśmie $(0,7 \div 1,2) \mu\text{m}$,
- laser forsterytowy ($\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$) w paśmie $(1,15 \div 1,35) \mu\text{m}$.

Pasma tych laserów prawie się uzupełniają. Ponadto są one pobudzane promieniowaniem koherentnym lasera Nd:YAG: laser tytanowy II harmoniczną (530 nm), a laser forsterytowy – podstawową (1,06 μm).

Zastosowanie laserów w metrologii

Jako **wzorzec długości** ustalono w roku 1960 "pomarańczowe" spontaniczne przejście $2p^{10} > 5d^5$, atomu kryptonu ^{86}Kr o długości fali 605,7802105 nm i względnej niestalości długości fali $3 \cdot 10^{-9}$. To przejście pozwalało na uzyskanie najdłuższej drogi koherencji spośród wszystkich znanych, spontanicznie emitowanych linii emisyjnych. Ta właściwość zadecydowała o jej wyborze jako wzorca długości.

Za **wzorzec czasu** przyjęto na XIII Generalnej Konferencji Wzorców i Pomiaru w roku 1967, jedno z przejść między dwoma poziomami struktury subtelnej stanu podstawowego atomu cezu ^{133}Cs . Jako sekundę uznano czas trwania 9 192 631 770 cykli wymienionego przejścia, a jednostkę częstotliwości odpowiednio jako odwrotność tej wielkości. Wzorzec ten zapewnia względną niestalość częstotliwości rzędu $(1-2) \cdot 10^{-13}$.

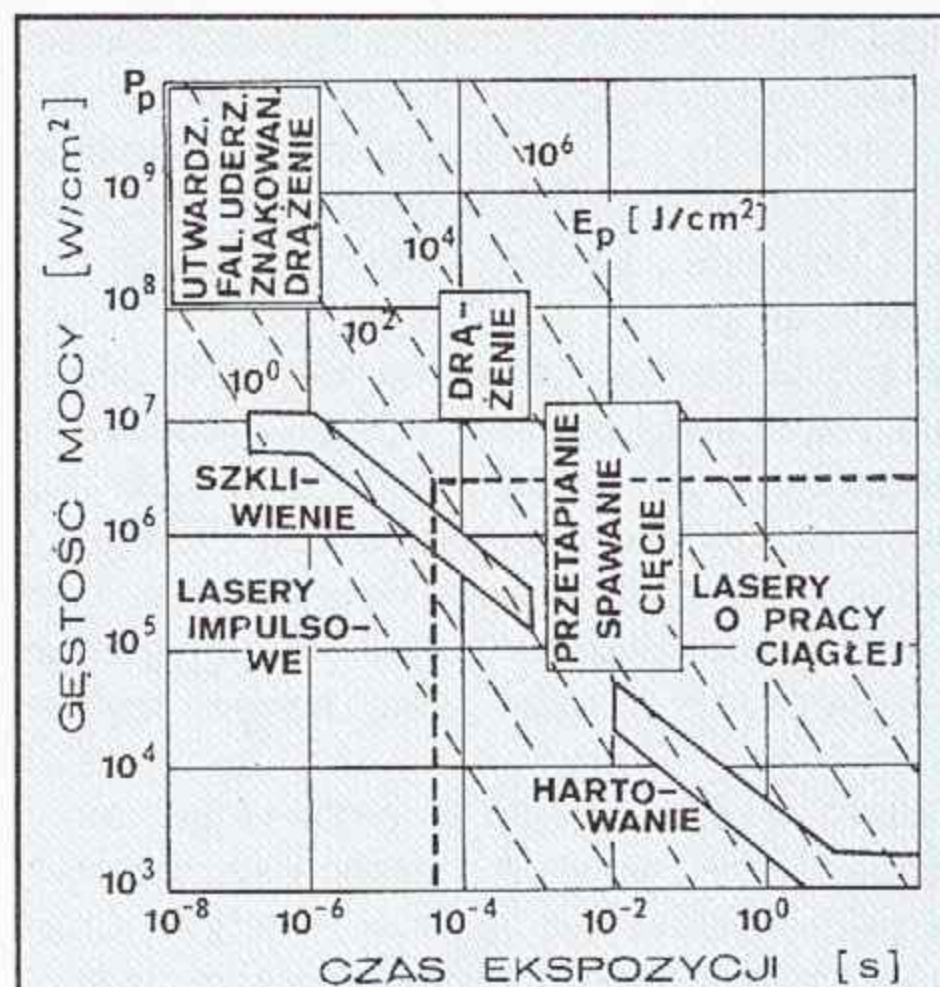
Lasery stwarzają możliwość połączenia obu wzorców (długości i częstotliwości) w jednym przyrządzie przy zwiększonej dokładności, a równocześnie przy niższym koszcie i dużej prostocie obsługi.

Cechy, które wyróżniają lasery spośród innych urządzeń pomiarowych i czynią je tak przydatnymi w metrologii można ująć następująco.

Laser jest generatorem kwantowym, którego działanie oparte jest na zjawiskach wynikających z budowy materii. Energia wewnętrzna atomu lub cząsteczki jest mało podatna na czynniki zewnętrzne i nie jest przez nie silnie zakłócona. Umożliwia to wytwarzanie promieniowania w zakresie optycznym o wysokiej stałości częstotliwości i dużej drodze spójności. W całym zakresie fal optycznych długość generowanej fali świetlnej jest dużo większa od wymiarów elementów optycznych biorących udział w generacji i kształtowaniu wiązki w połączeniu z wysokim stopniem koherencji promieniowania pozwala na formowanie wiązek laserowych o bardzo małych kątach rozbieżności ($10^{-3} \div 10^{-4}$) rad. Skupienie tych wiązek przez układy optyczne umożliwia osiągnięcie rozmiarów ogniska rzędu długości fali.

Większość ośrodków laserowych charakteryzuje się dużą szerokością pasma luminescencji, a co za tym idzie stwarzają one potencjalne możliwości generacji impulsów o krótkich czasach trwania.

Jeden z najczęściej stosowanych do generacji



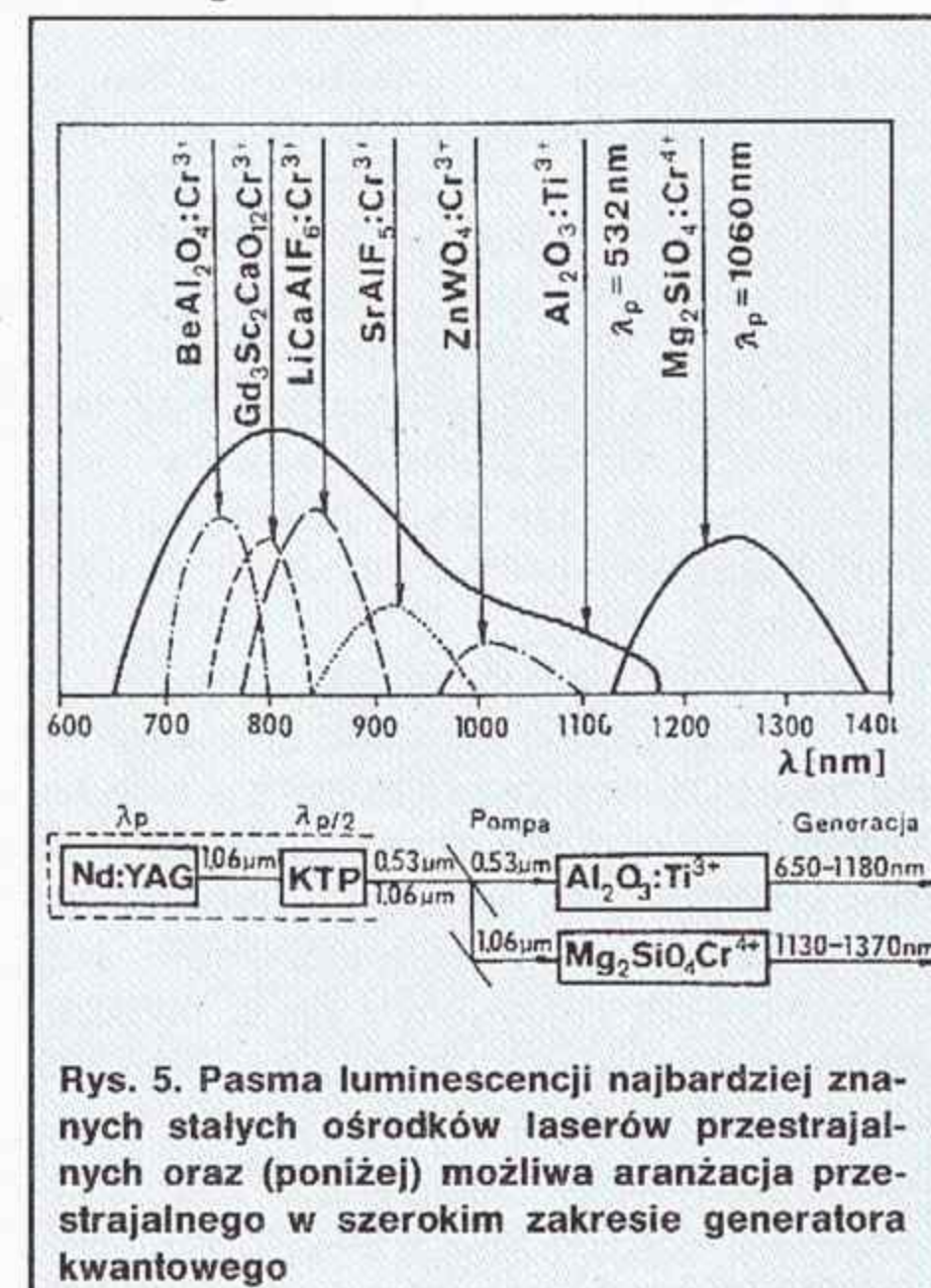
Rys. 4. Parametry obróbki laserowej dla różnych procesów technologicznych

impulsowej materiał czynny – Nd:YAG umożliwia generację impulsów o czasach trwania rzędu pikosekund.

Ośrodki stosowane w laserach przestrajanych (barwniki, aleksandryt itp.) mają wystarczające pasma do wytwarzania impulsów jeszcze krótszych – femtosekundowych (10^{-15} s). Stąd wkrótce po uruchomieniu pierwszych laserów zaczęto przystosowywać ich parametry do różnych zastosowań metrologicznych.

Na ogół laser może występować nie tylko jako wzorzec czasu i długości, ale ze względu na swoje naturalne cechy, znalazł inne zastosowania metrologiczne, a w szczególności w:

- interferencyjnych metodach pomiaru elementów w optyce i mechanice;
- interferometrii holograficznej;
- interferencyjnych metodach pomiaru przemieszczeń, kątów, odległości i prędkości;
- impulsowych metodach pomiaru odległości i prędkości w tym również do pomiaru ruchów tektonicznych Ziemi;
- metodach pomiaru stanu i skażeń środowiska naturalnego.



Rys. 5. Pasma luminescencji najbardziej znanych stałych ośrodków laserów przestrajalnych oraz (poniżej) możliwa aranżacja przestrajalnego w szerokim zakresie generatora kwantowego

W metrologii po raz pierwszy zastosowano laser do pomiaru odległości do obiektów wojskowych. Było to w styczniu 1961 r.

Zastosowanie laserów w technologii

Najbardziej dynamiczny udział techniki laserowej obserwuje się w technologiach obróbki materiałów. Świadczą o tym dane statystyczne, a mianowicie: wzrost technologii laserowej z 19,6% w 1989 r. do 32,9% w 1993 r. Wzrost zainteresowania laserami w medycynie i telekomunikacji w tym samym okresie, był tylko kilkuprocentowy. Stało się to już tradycją, że ważnym odbiorcą rynku technologii laserowej jest przemysł elektroniczny, samochodowy i lotniczy.

Pierwsze prace w latach 60. i 70. nad wykorzystaniem laserów do obróbki materiałów prowadzone były w warunkach laboratoryjnych. Wykorzystano do tego celu stałe lasery impulsowe o energii dochodzącej do 100 J w impulsie, które przeznaczono głównie do drażenia, punktowego spawania cienkich blach i drutów oraz mikroobrobki cieplnej.

Punktem zwrotnym w dziedzinie laserowej obróbki materiałów było opracowanie i zbudowanie pod koniec lat sześćdziesiątych laserów CO_2 o działaniu ciągłym. Lasery przemysłowe o mocach powyżej 1 kW zaczęły ukazywać się w latach siedemdziesiątych, a ich pojawienie się na rynku stworzyło możliwość wykonywania procesu spawania blach stalowych o grubości kilku mm. W chwili obecnej w przemyśle, do obróbki materiałów wykorzystuje się głównie trzy typy laserów: laser stały Nd:YAG o $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ o działaniu ciągłym (z możliwością pracy w trybie impulsowym), laser molekularny – gazowy CO_2 o działaniu ciągłym (z możliwością pracy w trybie impulsowym) i mocy dochodzącej do kilkudziesięciu kW, oraz lasery eks-cymerowe.

W obróbce materiałów z zastosowaniem laserów wykorzystuje się głównie termiczne efekty absorpcji promieniowania laserowego. Oddziaływanie termiczne zaabsorbowanego promieniowania prowadzi do lokalnego nagrzewania, przetapiania lub odparowania materiału, a w konsekwencji powoduje zmiany jego struktury, własności bądź kształtu w precyzyjnie obrabianym miejscu.

Obróbkę cieplną za pomocą promieniowania laserowego charakteryzuje łatwość uzyskiwania na powierzchni obrabianego materiału dużych gęstości mocy promieniowania dochodzących do 10^{14} W/cm^2 .

Czas oddziaływania impulsu z materiałem może być od femtosekund (10^{-15} s), aż do sekund. Dzięki temu, temperaturę wymaganą do celów obróbki lub mikroobrobki uzyskuje w krótkim czasie tylko cienka warstwa materiału lub grupy molekuł czy atomów, podczas gdy warstwy położone dalej od miejsca obróbki pozostają "zimne". Przerwanie dopływu energii lub zmiana miejsca nagrzewania powoduje, że ciepło z nagrzanej warstwy jest gwałtownie odprowadzane na drodze przewodnictwa do głębiej położonych chłodnych warstw materiału.

Lasery Nd:YAG pozwalają na cięcie, spawanie,

przetapianie, znakowanie, a także na utwardzanie powierzchni obrabianego materiału za pomocą fali uderzeniowej. Lasery Nd:YAG ze względu na niewielkie wymiary w odniesieniu na jednostkę mocy emitowanego promieniowania, wykorzystuje się głównie do znakowania, drażenia, spawania i cięcia precyzyjnych elementów konstrukcyjnych. Dodatkową zaletą tego lasera jest to, że jego długość fali jest dobrze transmitowana światłowodami, a w związku z tym promieniowanie można doprowadzić do miejsca obróbki wymagającego w przestrzeni wielu stopni swobody.

Lasery molekularne CO₂ o $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ posiadają większą niż Nd:YAG sprawność przetwarzania energii elektrycznej na energię promienistą rzędu (10 - 15)%. Ta właściwość decyduje więc o tym, że są to lasery o dużych mocach wyjściowych.

Lasery Nd:YAG i CO₂, głównie ze względu na niskie jednostkowe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne w odniesieniu do jednostkowej mocy emitowanego promieniowania są najczęściej wykorzystywane w przemyśle maszynowym. Najczęściej wykorzystywane są w takich procesach jak: utwardzanie powierzchniowe, spawanie, nasycanie, naparowywanie, cięcie i drażenie otworów.

Lasery ekscimerowe, tzn. lasery o krótszych długościach fal od $\lambda = 0,190 \mu\text{m}$ do $0,248 \mu\text{m}$, aktualnie nie znajdują tak powszechnego zastosowania jak omawiane wcześniej lasery Nd:YAG i CO₂ ze względu na niskie jeszcze moce i bardzo wysokie koszty inwestycyjne. Wykorzystywane są głównie w technologiach specjalnych, jak np.: litografii laserowej, fotochemii, mikrodrażarkach. Wysokoenergetyczne kwanty promieniowania tych laserów stwarzają inną możliwość oddziaływania na materię, a mianowicie wywołują tzw. efekt ablacji polegający na zmniejszeniu energii wiązań między cząsteczkami. W wyniku tego możemy zdejmować bardzo precyzyjnie jedną warstwę atomową po drugiej. Tak wysokoenergetyczne kwanty promieniowania wykorzystuje się głównie do osadzania warstw lub trawienia struktur cienkowarstwowych. Ze względu na długość fali, lasery ekscimerowe są bardziej precyzyjnymi narzędziami obróbki, co najwyraźniej obserwuje się w przypadku drażenia otworów. Również głębokość wnikania tego promieniowania w różnego typu materiały stwarza pewne preferencje w zastosowaniach technologicznych. Promieniowanie o krótszych długościach fal można zogniskować do niewielkich wymiarów. Pozwala to drażyć w dielektrykach otwory o średnicy poniżej $10 \mu\text{m}$.

Podobnie jak w rozdziale o zastosowaniu laserów w medycynie, tak i tu przedstawia się parametry oddziaływania promieniowania na materiał dla różnych procesów technologicznych. Rys. 4 pokazuje, że można tak dobrać parametry oddziaływania na materiał, zarówno dla laserów o pracy ciągłej (prędkość przesuwu wiązki lub materiału) jak i laserów impulsowych (czas trwania impulsu) i tak dobrać gęstość mocy (gęstość energii), że dla obu grup laserów, a mianowicie Nd:YAG i CO₂ można prowadzić zbliżone procesy technologiczne (za wyjątkiem drażenia). W zależności od rodzaju mate-

riału (jego przewodnictwa cieplnego, ciepła właściwego, temperatury topnienia, temperatury wrzenia itp.), prowadzenie konkretnego procesu technologicznego wymaga odpowiedniego dobrania gęstości mocy i czasu oddziaływania.

Na proces technologiczny ma wpływ atmosfera gazowa miejsca obróbki, a także usytuowanie płaszczyzny polaryzacji promieniowania w stosunku do kierunku przesuwu wiązki. Parametry materiałowe przestają decydować o przebiegu procesu technologicznego dla krótkich czasów oddziaływania promieniowania laserowego poniżej 10^{-7} s.

Lasery wykorzystywane w obróbce materiałów mogą również na wiele sposobów, kształtować strukturę warstwy wierzchniej materiału. Charakter oddziaływania promieniowania laserowego na materiał zależy również od długości fali, gęstości mocy promieniowania i czasu jego oddziaływania. Oddziaływanie to można podzielić na szereg rodzajów. Przemiany fazowe w stanie stałym, które uzyskuje się przez nagrzewanie, np. wierzchniej warstwy stali aż do tzw. temperatur austenizowania i ich gwałtownego studzenia – hartowania lub przez ich powolne chłodzenie prowadzi do procesu obróbki zwanej wyżarzaniem. Z kolei w zależności od szybkości ochładzania przetopionej cienkiej warstwy powierzchniowej, możemy uzyskać warstwę o silnie rozdrobnionej strukturze bądź warstwę amorficzną o nie zmienionym składzie chemicznym w stosunku do rdzenia materiału, lecz o dużej jednorodności składu chemicznego. W tym procesie można uzyskiwać również wzbogacanie warstw powierzchniowych w wybrane dodatki stopowe lub platerować, tzn. na powierzchnię nakładać inną warstwę o innym składzie chemicznym. Taka warstwa zapewnia obrabianemu materiałowi z góry określone własności, np.: odporność na korozję, żaroodporność itp. Kolejne oddziaływanie to udarowe odkształcenie warstw powierzchniowych materiału spowodowane przez falę naprężeń powstającą w wyniku ogromnego skoku temperatury wywołanego krótkotrwałym impulsem laserowym o dużej mocy.

Współczesne laserowe urządzenia przemysłowe konstruuje się często jako wysoce specjalizowane ciągi technologiczne. Znajomość podstawowych parametrów technicznych wiązki laserowej (długość fali, gęstość mocy, czas trwania impulsu, jego kształt, płaszczyzna polaryzacji w stosunku do powierzchni materiału itp.) jest niezbędna do prawidłowej oceny i przydatności danego urządzenia laserowego, jak również porównania go z innymi tego typu urządzeniami.

W zakończeniu szczególnie tego rozdziału autorzy zwracają uwagę dotyczącą bezpieczeństwa pracy z laserami przy obróbce materiałów. Przepisy bezpieczeństwa pracy z promieniowaniem laserowym są określone przez Polską Normę PN-91/T-06700 "Bezpieczeństwo przy promieniowaniu emitowanym przez urządzenia laserowe., Klasyfikacja sprzętu. Wymagania i wytyczne dla użytkownika".

W normie tej podano między innymi:

– zagrożenia powodowane przez promieniowanie laserowe;

– podział laserów i urządzeń laserowych na klasy pod względem zagrożeń;
– działania i środki zapewniające bezpieczną pracę z laserami.

Kierunki rozwoju

Zastosowanie laserów, kierunki ich zastosowań, pozostają w ścisłym związku z cechami charakterystycznymi emitowanego przez nie promieniowania. W najbliższym czasie jednakże, w każdej z wymienionej dziedzin zastosowań laserów, należy spodziewać się szerokiej innowacji, dotyczących źródeł promieniowania laserowego jak i jego aplikacji.

Szczególną rolę odgrywa i odgrywać będzie podniesienie sprawności laserów, zwłaszcza stałych. W ostatnim okresie wiele uwagi poświęca się pobudzaniu tych laserów przy pomocy laserów półprzewodnikowych, które w niedalekiej przyszłości wyprą całkowicie klasyczne pobudzanie lampowe. Dopasowanie długości fali generacji diod laserowych do pasm absorpcji materiałów aktywnych, zmniejszenie wymiarów i mocy zasilającej, osiąganie niezwykłej niezawodności i czasu życia takich laserów to podstawowe atuty takiego rozwiązania. Ponadto, zastosowanie nowej generacji zwierciadeł laserowych sprzęgających fazę (tzw. *phase conjugation mirrors*) umożliwi otrzymywanie idealnych parametrów przestrzennych wiązki laserowej.

Szczególną rolę będą zajmować lasery stałe przestrajalne, obecnie już wypierające lasery barwnikowe, do których zalicza się: aleksandryt, tytan, forsteryt, lasery półprzewodnikowe i na centrach barwnych. Tę klasę laserów wspomagają i będą wspomagać coraz to nowsze, sprawniejsze i bardziej odporne na gęstość mocy kryształy nieliniowe, przetwarzające promieniowanie laserowe na wyższe harmoniczne oraz optyczne generatory parametryczne. Dynamiczny postęp w zakresie technologii umożliwił otrzymanie nowych krystalicznych materiałów czynnych jak: LICAF GSGG (Gd₃Sc₂Ga₃O₁₂:Cr³⁺) oraz innych przedstawionych na rys. 5, posiadających pasma dwukrotnie przewyższające pasma przestrajania najlepszych barwników. Najnowsze ośrodki, takie jak korund domieszkowany trójwartościowym tytanem oraz forsteryt mają pasmo przestrajania nieporównywalne z innymi materiałami. One to wspólnie z kryształami nieliniowymi umożliwiają generację promieniowania w przedziale od 350 nm do 1370 nm. Taki generator zajmie pewne miejsce w biologii i medycynie, w zdalnym monitoringu środowiska naturalnego itp.

Przyszłościowe badania naukowe, oczywiście z wykorzystaniem laserów, które osiągną wartość gęstości mocy, rzędu 10^{22} W/cm^2 , umożliwią badania rozproszenia fotonu na fotonie, wielokrotnej jonizacji atomów oraz polaryzacji próżni co, jak się przewiduje, zakończy się nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki.

Przedstawiony zarys kierunków rozwoju i zastosowań laserów jest oczywiście dalece niekompletny. Jednakże, oczywistym jest wniosek, że poszerzająca się aplikacja światła koherentnego stymuluje rozwój techniki i technologii, a wylansowane hasło, *Future belongs to the foton* w jednym z profesjonalnych pism dotyczącego tematyki laserowej pt. *Laser Focus World*, staje się coraz bardziej realne. □

Fale elektromagnetyczne obejmują niezwykle szeroki zakres częstotliwości i długości fali zachowując przy tym jednakowy charakter fizyczny i podlegając tym samym ogólnym prawom. Wystarczy powiedzieć, że długość fal radiowych (w zakresie fal długich) ma się tak do długości fal światła widzialnego jak odległość Ziemia - Słońce do grubości kartki papieru. Podobną proporcję mamy między światłem widzialnym a promieniowaniem gamma, które w widmie fal elektromagnetycznych następuje po promieniowaniu X (rentgenowskim).

Promieniowanie gamma wróg czy przyjaciel?

Michał Nadachowski

Granica między promieniowaniem rentgenowskim a gamma nie jest dokładnie określona, a co więcej obszary długości fali obu tych promieniowań zachodzą na siebie. Jest tak dlatego, gdyż przy klasyfikacji bierze się pod uwagę nie tylko długość fali, ale także pochodzenie promieniowania. Jako rentgenowskie przyjmuje się promieniowanie pochodzenia atomowego, a gamma – jądrowego. W praktyce promieniowanie rentgenowskie jest wytwarzane w lampach rentgenowskich, a promieniowanie gamma pochodzi ze źródeł promieniotwórczych. Jednak niektóre źródła emitują również promieniowanie rentgenowskie.

(keV) lub megaelektronowolty (MeV). Energię kwantu w eV łatwo przelicza się znając długość fali. Nie wdając się w obliczenia można stwierdzić, że wystarczy do nich znajomość dwóch ważnych stałych fizycznych – stałej Plancka i szybkości światła. Promienie X mają energię od ok. 0,1 keV do 300 keV, a gamma – większą od 10 keV.

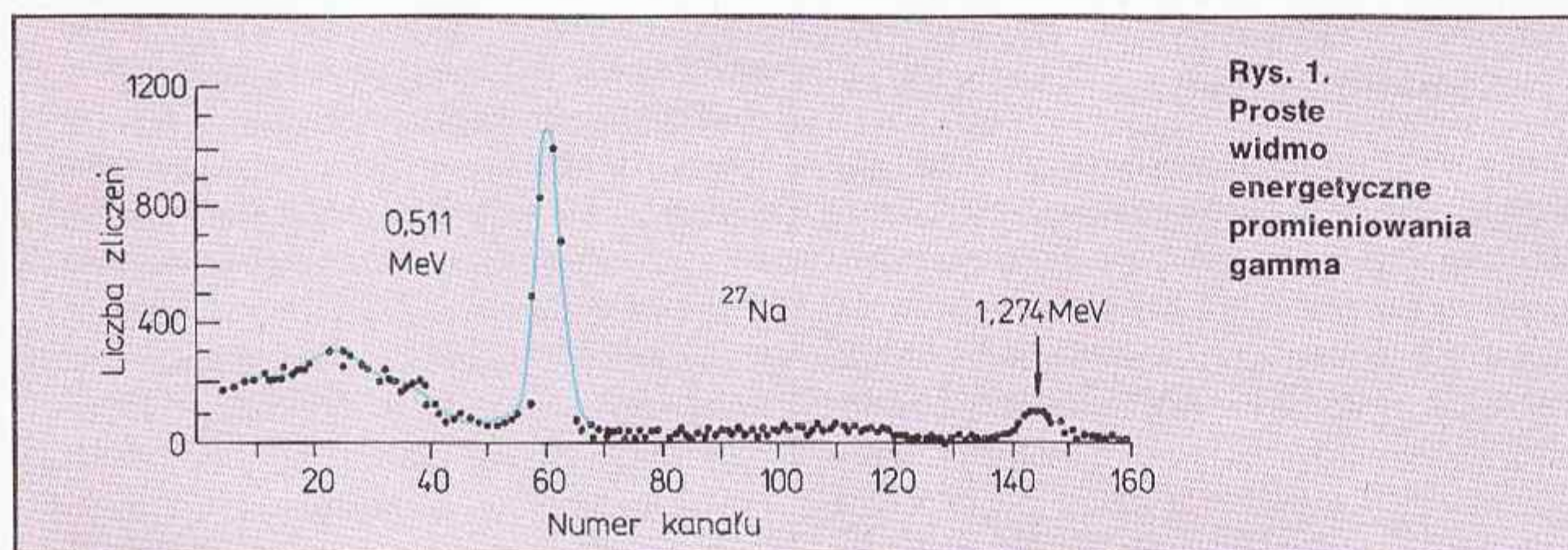
Wróg czy przyjaciel?

Im fala jest krótsza, tym energia większa. Tak więc **promieniowanie gamma o mniejszej długości fali ma większą energię** i dlatego jest bardziej przenikliwe. Takie promieniowanie nazywa się "twardszym" w odróż-

chni ciała, a do naświetlań tkanek głębiej położonych konieczne jest promieniowanie twardsze. Terapia nowotworowa nie jest jedynym zastosowaniem promieniowania gamma. W medycynie radioizotopy gamma są też użyteczne do diagnostyki – na przykład w scyntygrafii. Ta metoda polega na wprowadzaniu do organizmu niewielkiej ilości radioizotopu i badaniu jego rozmieszczenia się w tkankach, w celu określenia ewentualnych zmian patologicznych. Typowym zastosowaniem są badania tarczycy za pomocą promieniotwórczego jodu. Miarą czynności tarczycy jest szybkość gromadzenia przez nią jodu. Po podaniu pacjentowi radioizotopu jodu łatwo można zmierzyć zewnętrznym czujnikiem radiometrycznym szybkość wzrostu zawartości jodu w tarczycy. Podaje się oczywiście izotop o krótkim czasie zaniku, aby nie mógł zaszkodzić pacjentowi.

Ważnym zastosowaniem promieniowania X i gamma jest też tomografia komputerowa do diagnostyki nowotworowej.

Źródła promieniowania gamma są szczególnie użyteczne do badania procesów w niedostępnych z zewnątrz częściach instalacji przemysłowych. Wędrówkę celowo wprowadzonego izotopu promieniotwórczego śledzi się czujnikami umieszczonymi na zewnątrz instalacji. Inną dziedziną zastosowań przemysłowych jest defektoskopia. Dużą przenikalność promieniowania gamma wykorzystuje się do prześwietleń konstrukcji nawet o dużej grubości w celu wykrycia pęknięć i innych defektów.

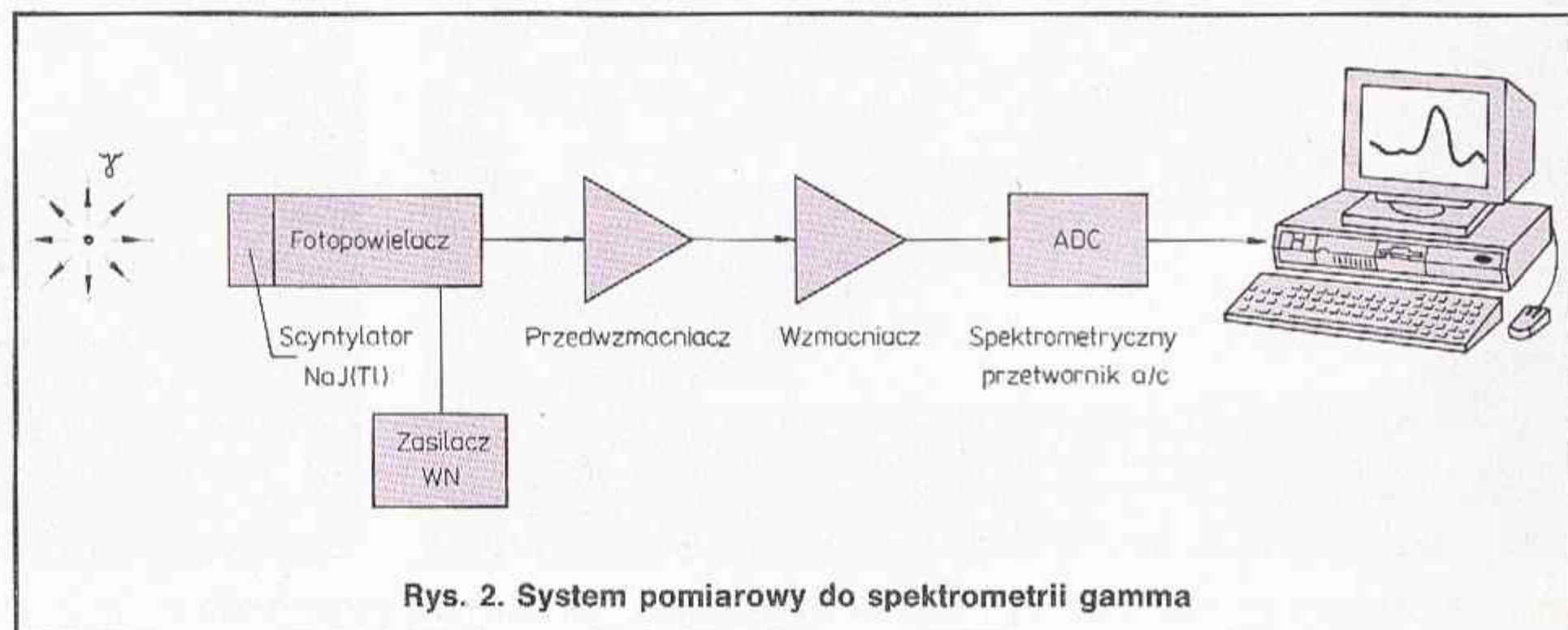


Rys. 1.
Proste
widmo
energetyczne
promieniowania
gamma

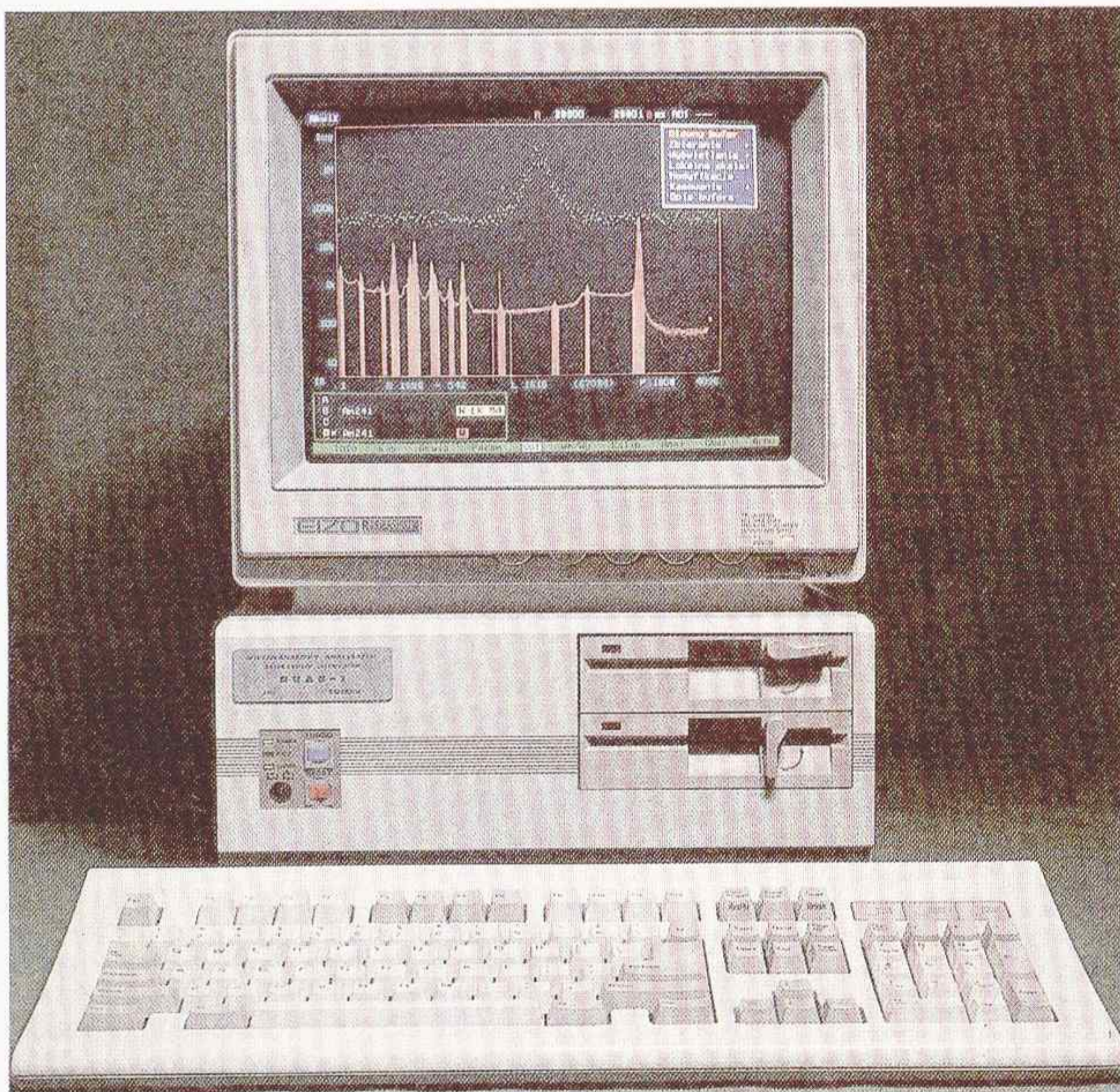
Fale lub kwanty

Promieniowanie gamma jest znane ludzkości od 100 lat. Jako pierwszy jego emisję z soli uranowych zauważył Becquerel w 1896 roku, a wkrótce potem bardziej szczegółowo zbadał to zjawisko Rutherford. Zakres promieniowania gamma obejmuje długości fali poniżej 0,1 nm (1 nm = 10^{-9} m), a promieniowania X od ok. 10 nm do ok. 0,005 nm. Jak wiadomo fale elektromagnetyczne mogą być przedstawiane także jako **strumień fotonów, czyli kwantów energii** i dlatego zamiast o długości fali można mówić o **energii kwantu**. Jednostką energii stosowaną w tym przypadku jest elektronowolt, którego skrót brzmi eV. Jest to energia nabyta przez elektron przy przebyciu różnicy potencjałów równej jednemu voltowi. Elektronowolt jest jednostką bardzo małą. W praktyce stosuje się jednostki większe, np. kiloelektronowolty

nieniu od "miękkiego" promieniowania o mniejszej energii. Ma to znaczenie praktyczne, np. w terapii nowotworowej. Do naświetlań skóry używa się promieniowania X lub gamma miękkiego, które dzięki małej energii jest pochłaniane tuż przy powierz-



Rys. 2. System pomiarowy do spektrometrii gamma



Rys. 3. Analizator amplitudy typu SWAN (opracowany w IPJ w Swierku)

Mnogość zastosowań promieniowania gamma nie zmienia faktu, że **jest ono szkodliwe dla człowieka**. Dlatego konieczna jest ochrona – przez pomiary tła promieniowania gamma w powietrzu, wodzie, żywności oraz przez budowę osłon urządzeń zawierających źródła gamma. Szkodliwość promieniowania gamma dla organizmów żywych (również bakterii i wirusów) jest zresztą wykorzystywana – np. do sterylizacji instrumentów medycznych, strzykawek itd.

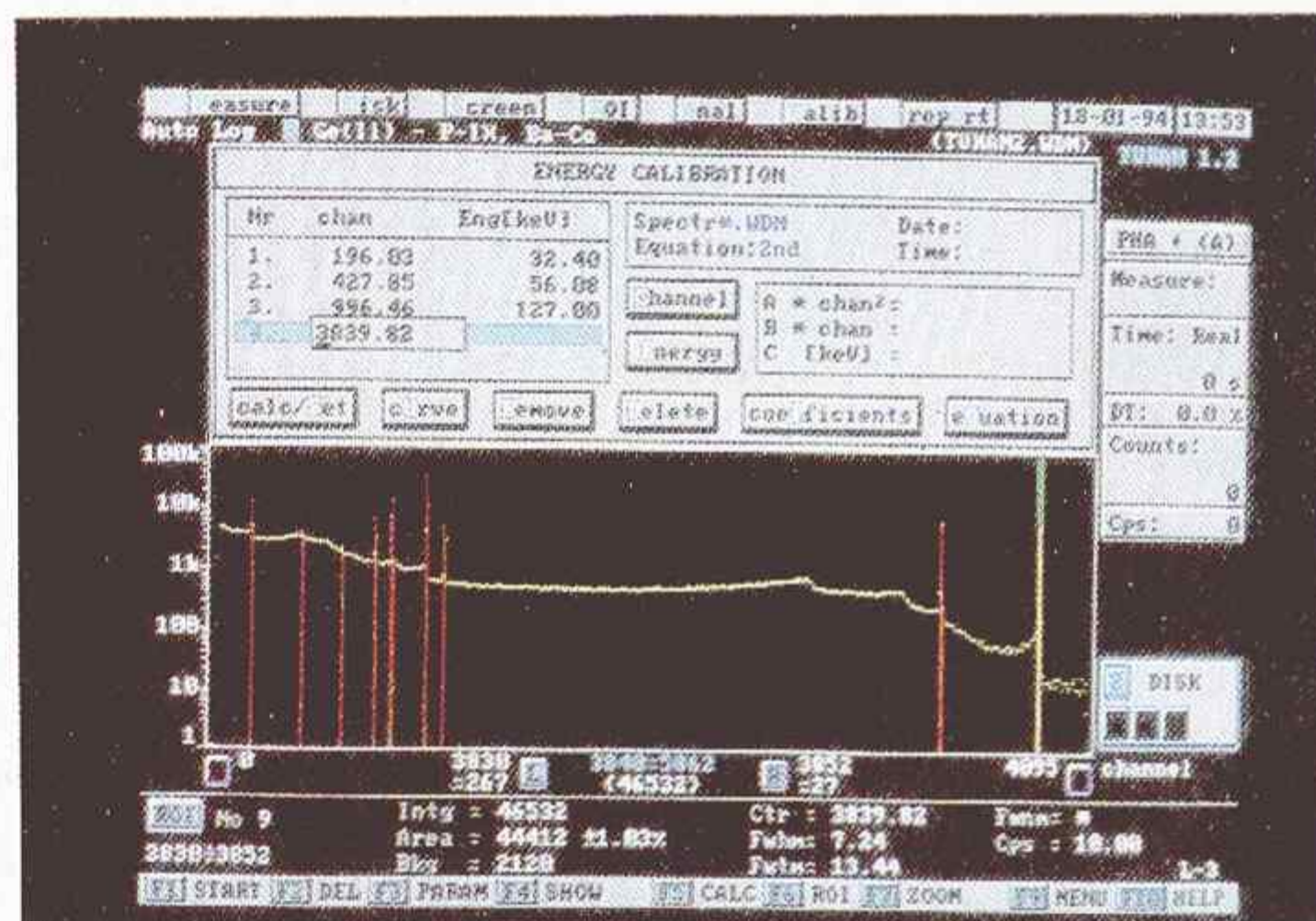
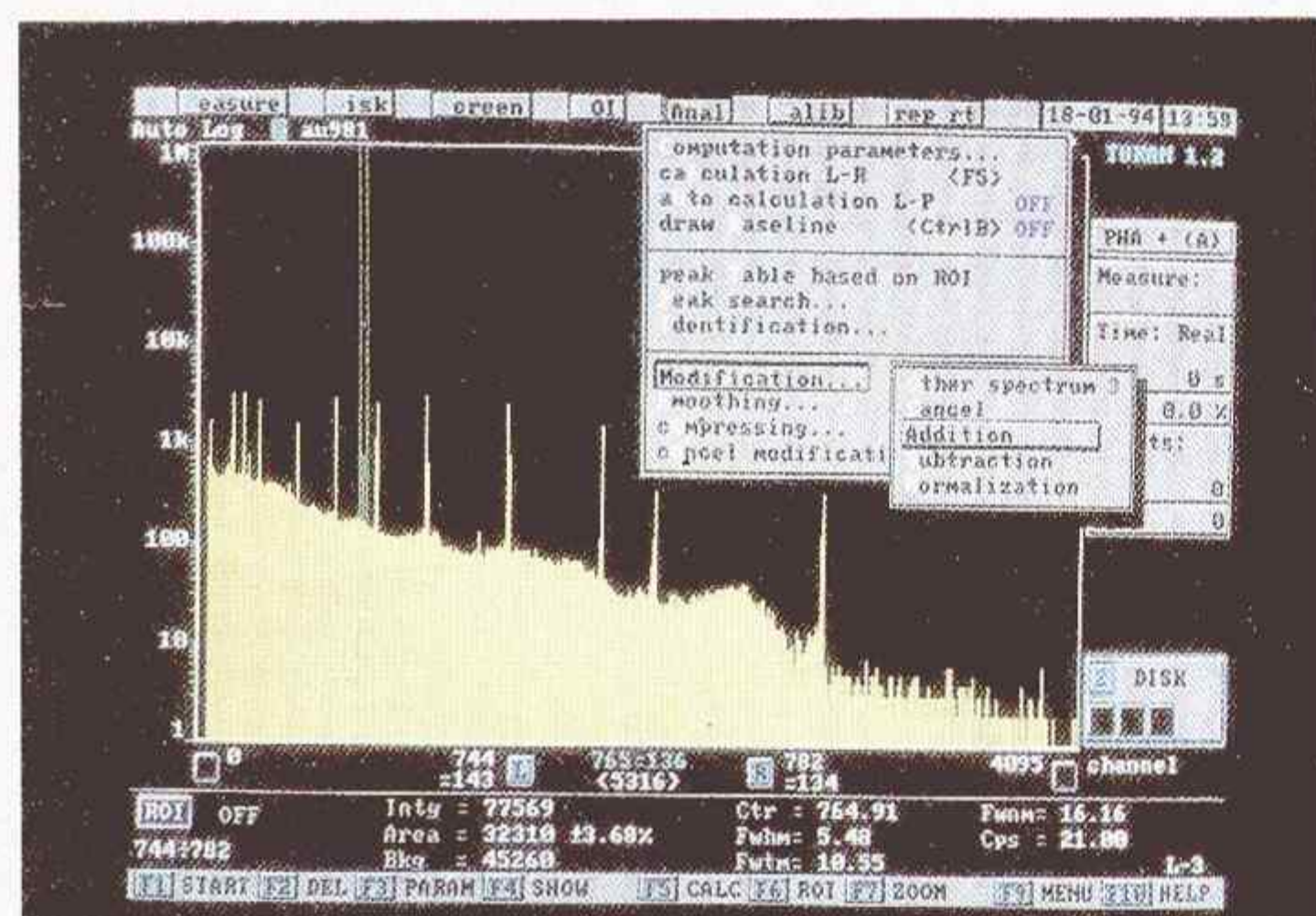
Spektrometria gamma

Pomiary promieniowania gamma są, jak widać, niezbędne zarówno w celu skutecznej ochrony przed nim, jak i do jego racjonalnego wykorzystania. Czasem wystarczy stwierdzić istnienie promieniowania gamma i określić tylko jego natężenie, czyli zmierzyć, ile kwantów jest rejestrowane w ciągu sekundy. Do tego służą takie dość proste detektory, jak liczniki Geigera-Mullera stosowane w dozymetrii. W chwili przejścia

kwantu gamma przez taki licznik następuje w nim gazowe wyładowanie elektryczne dające na wyjściu duży impuls, którego wartość nie zależy od energii kwantu. Dlatego licznik Geigera-Mullera nie nadaje się do pomiarów energii. W wielu przypadkach jest jednak potrzebne właśnie określenie **energii promieniowania**, czyli wyznaczenie tzw. **widma energetycznego**.

Na rysunku 1 przedstawiono przykład prostego widma energetycznego. Jest to widmo promieniowania gamma emitowanego przez izotop sód-22. Zazwyczaj widma są bardziej złożone. Znając takie widmo, np. próbki mchu lub owoców leśnych, można stwierdzić nie tylko, jak silnie jest skażone, lecz także jakimi izotopami. Energie emitowane przez różne izotopy są znane i skatalogowane. Analizując linie widma można określić, jakimi izotopami promieniotwórczymi jest zanieczyszczona badana próbka. Ważne jest na przykład, czy w takiej próbce występuje, powiedzmy, krótkożyłowy jod-131 (okres półtrwania 8 dni), dający kilka linii gamma o określonej energii, czy raczej długożyłowy (półtrwanie 27 lat) – i przez to bardziej niebezpieczny – cez-137, dający energię 0,66 MeV. Oba te izotopy pojawiły się jako zanieczyszczenie środowiska po awarii czarnobylskiej.

Pomiary energetyczne promieniowania gamma noszą nazwę **spektrometrii gamma** (łac. spectrum – widmo). Do określania widm są stosowane różne detektory, z których dwa rodzaje mają największe znaczenie praktyczne: detektory scyntylacyjne i półprzewodnikowe. W detektorach scyntylacyjnych wykorzystuje się fluorescencję wywołowaną przez promieniowanie gamma w niektórych kryształach, np. jodku sodu i jodku cezu. Przejście kwantu gamma przez taki kryształ daje rozbłysk (światła widzialnego lub częściej w nadfiolecie) o natężeniu proporcjonalnym do energii kwantu. Jest to bardzo mała ilość światła wymagająca wzmocnienia. Słu-



Rys. 4. Przykłady widm energetycznych zdjętych analizatorem TUKAN (pro. firmy PROFEL) a – widmo zmierzone, b – kalibracja

ży do tego specjalna, wieloelektrodowa lampa próżniowa zwana fotopowielaczem, czyli wzmacniaczem światła. Kryształ scyntylacyjny przylega do katody fotopowielacza, z której fotony światła wybijają elektrony. Strumień elektronów odpowiednio ogniskowany uderza w następną elektrodę (tzw. dynodę), zbudowaną z materiału o dużym współczynniku emisji wtórnej. Z dynody jest więc wybijane więcej elektronów niż w nią uderza. Strumień jest kierowany do kolejnej dynody. Fotopowielacz ma ich kilkanaście, więc wzmacnienie jest duże i na anodzie uzyskuje się impuls elektryczny wystarczająco duży do dalszego wykorzystania. Zarówno dynody, jak i anoda wymagają spolaryzowania. Ponieważ dynod jest wiele, a każda musi mieć coraz wyższy potencjał, więc cały fotopowielacz wymaga wysokiego napięcia zasilającego (1 kV – 3 kV) przy niewielkiej pobieranej mocy (prąd dzielnika od 0,5 mA do 2 mA).

Detektor półprzewodnikowy jest, specjalnie wykonany z germanu lub krzemu, złączem p-n, w którym przejście kwantu gamma uwalnia nośniki ładunków (elektrony, dziury), dając impuls elektryczny o ładunku proporcjonalnym do energii kwantu. Zaletą detektorów półprzewodnikowych jest znacznie lepsza niż w scyntylacyjnych zdolność rozdzielcza, tzn. uzyskiwanie węższych, bardziej dokładnych prążków energetycznych. W detektorze scyntylacyjnym względna szerokość prążka jest rzędu kilku procent, w półprzewodnikowym zaś może osiągać nawet 0,1%, co przy energiach kilku MeV daje szerokość prążka 2-3 keV. Takim detektorem można więc badać widma bardzo złożone, o wielu prążkach bez obawy ich wzajemnego nakładania się. Wadą detektorów półprzewodnikowych jest konieczność ich pracy w niskiej temperaturze ciekłego azotu, co wymaga specjalnych kriostatów.

Analiza amplitudowa

Tak z detektora scyntylacyjnego, jak i z półprzewodnikowego uzyskuje się impuls elektryczny o amplitudzie (lub ładunku) proporcjonalnym do energii kwantu. Są to impulsy szybkie – o czasach trwania rzędu mikrosekund lub nawet nanosekund. Pomiar widma energetycznego polega na odpowiednim uformowaniu i wzmacnieniu tych impulsów, posegregowaniu ich według amplitudy, zgromadzeniu w pamięci i następnie zobrazowaniu uzyskanego histogramu na ekranie monitora, ploterze, drukarce itp. System pomiarowy z detektorem scyntylacyjnym przedstawiono na rys. 2. Aparatura do spektrometrii gamma z detektorem półprzewodnikowym jest bardzo podobna: nie zawiera fotopowielacza, a przedwzmacniacz formuje impulsy w taki sposób, aby amplituda była proporcjonalna do ładunku, dając informację o energii kwantu gamma.

W systemie przedstawionym na rysunku 2 impuls z fotopowielacza jest kształtowany i wzmacniany w przedwzmacniaczu i we wzmacniaczu głównym. Następnie amplituda impulsu jest przetwarzana na wielkość cyfrową w spektrometrycznym przetworniku analogowo-cyfrowym. Uzyskane wartości, już w postaci cyfrowej, są segregowane i gromadzone w pamięci, dając obraz widma energetycznego badanego promieniowania. Urządzenia służące do tego celu nazywają się wielokanałowymi analizatorami amplitudy (ang. – *multichannel amplitude analyzers*). Niegdyś były to specjalizowane przyrządy samodzielne. Obecnie wiele funkcji analizatora może wykonać komputer osobisty. Bazą nowoczesnego analizatora amplitudy jest więc komputer osobisty uzupełniony o wyspecjalizowane układy – spektrometryczny przetwornik a/c oraz dodatkowy bufor pamięciowy. Istotnym elementem analizatora jest oprogramowanie, które często bywa

bardzo rozbudowane z uwagi na konieczność matematycznej obróbki widm służącej, np. do identyfikacji poszczególnych pików widma, na podstawie zgromadzonego w pamięci katalogu widm wzorcowych. Taka identyfikacja ma, jak już powiedziano, szczególne znaczenie w ochronie środowiska, gdyż poszczególne linie widma odpowiadają określonym zanieczyszczeniom promieniotwórczym.

Na rysunku 3 przedstawiono urządzenie, które z wyglądu jest zwykłym komputerem IBM/PC. Komputer jest jednak wyposażony w dwie dodatkowe specjalne karty (przetwornika i bufora) i bogate dodatkowe oprogramowanie tworząc 4096-kanałowy analizator amplitudy typu SWAN (opracowany w Instytucie Problemów Jądrowych w Świerku). Na ekranie monitora widać złożone widmo zebrane za pomocą analizatora. Analizator jest wyposażony w 12-bitowy przetwornik a/c, co daje 4096 poziomów segregacji amplitudy. Stąd bierze się określenie: analizator 4096-kanałowy.

Bogatszym oprogramowaniem dysponuje analizator typu TUKAN opracowany w krajowej firmie PROFEL. Na rys. 4 przedstawiono fotografie ekranów monitora z widmami promieniowania gamma. Dodatkowe informacje wyświetlane na ekranie w postaci okien umożliwiają dobór parametrów pomiaru. Na rys. 4a przedstawiono widmo zmierzone, a na rys. 4b – kalibrację widma.

Gamma z kosmosu

Fale elektromagnetyczne o największych energiach – nawet do 10¹⁶ eV przybywają do nas z kosmosu. Znaczna część tego promieniowania jest pochłaniana w atmosferze. Dlatego pomiary prowadzi się głównie ze specjalnych balonów, rakiet i statków kosmicznych. Wyniki tych pomiarów dostarczają astronomom i astrofizykom ważnych informacji o budowie wszechświata. □

Redaktor: inż. Maria Łopusznik
Redaktor techniczny: Beata Włodarczyk

© Copyright by Radioelektronik Sp. z o.o., Warszawa, 1994 r.

Wydawca RADIOELEKTRONIK
Spółka z o.o.
ul. Świętojerska 5/7, 00-236 Warszawa

Druk: Zakłady Graficzne Spółka z o.o.
ul. Okrzei 5, 64-920 Piła.

Na okładce:

Nietoperz z bardzo precyzyjnym organem zmysłu wytwarzającym i odbierającym ultradźwięki, posługuje się własnym "radarem" w wędrówkach po mrocznych grotach i jaskiniach. Fot. Andrzej Kepel

Radar FPS -117 firmy Martin Marietta może pracować jako stacjonarny lub ruchomy, gdy jest zainstalowany na podwoziu.

